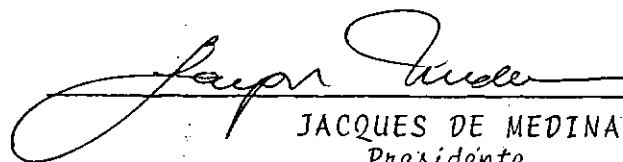


ESTUDO DE IRREGULARIDADES DE SUPERFÍCIE  
DAS PISTAS DE POUSO DE DOIS AERÓDROMOS MILITARES

SAMUEL HANTHEQUESTE CARDOSO

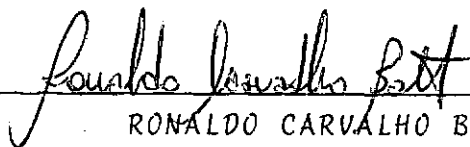
TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE  
PÓS - GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE  
JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO  
DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc.).

Aprovada por:



---

JACQUES DE MEDINA  
Presidente



---

RONALDO CARVALHO BATISTA



---

CESAR AUGUSTO VIEIRA DE QUEIROZ

CARDOSO, Samuel Hanthequeste

Estudo de Irregularidades de Superfície das Pistas de Pouso de Dois Aeródromos Militares. [Rio de Janeiro], 1982.

X, 158 p., 29,7 cm (COPPE / UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 1982).

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia - Coordenação dos Programas de Pós - Graduação de Engenharia. Programa de Engenharia Civil.

1. Irregularidades de Superfícies de Pistas de Pouso

I. COPPE / UFRJ

II. TÍTULO (Série)

A  
meus PAIS,  
pela formação moral que me deram, ali-  
cerce e viga - mestra de minha vida.

À  
minha esposa e filhos  
- NILZA, LANA, RALPH e DAVIS,  
pelo carinho, compreensão e sacrifício  
sempre dispensados e redobrados por oca-  
sião do desenvolvimento deste trabalho.

À  
DIRETORIA DE ENGENHARIA DA AERONÁUTICA,  
pelo constante incentivo ao aprimoramen-  
to técnico - científico de seus Técnicos  
e pelo patrocínio desta Tese.

## A G R A D E C I M E N T O S

- Ao Professor JACQUES DE MEDINA, pelo incentivo à iniciativa, orientação segura e serena nos momentos necessários e, acima de tudo, por sua vasta experiência posta à disposição da pesquisa.

- Aos colegas ERNESTO e LAURA, pelo grande apoio prestado, principalmente na fase inicial deste trabalho.

- Ao Professor MÁRCIO MIRANDA SOARES, pelas palavras de estímulo e orientação durante meus primeiros meses do Curso na COPPE / UFRJ.

- Ao Professor BASÍLIO DE BRANCAÇA PEREIRA, pelos esclarecimentos de dúvidas surgidas no decorrer deste trabalho.

- Aos Professores da ÁREA DE MECÂNICA DOS SOLOS, pelo muito que me ensinaram.

- Ao amigo DEOSDEDES FRANCISCO BARCELLOS, pelo apoio nos momentos difíceis e pelo incentivo que sempre me deu na busca do saber.

- Ao Professor HOMERO PASSOS PINTO WERNECK DE CARVALHO, por ter me estimulado a me dedicar à Engenharia Civil.

- Ao Exmo. Sr. Brigadeiro Engenheiro ÊNIO RUSSO, pelo muito que me incentivou a aperfeiçoar meus conhecimentos, mesmo antes de eu ter a honra de servir sob seu Comando.

- Aos Senhores Comandantes das BASES AÉREAS DE SANTA CRUZ (RJ) e CANOAS (RS), pelo apoio oferecido nos anos de 1980 a 1982, e indispensável ao desenvolvimento dos trabalhos de campo naqueles dois Aeródromos Militares.

- Ao Coronel Engenheiro HUGO NICODEMO GUIDA, Subdiretor de Infra-estrutura da Aeronáutica, pelo inestimável apoio e interesse dispensados ao meu trabalho.

- Ao Coronel Engenheiro ALMIR BRANDÃO LOPES, pela atenção com que sempre me distinguiu.

- Ao Coronel Engenheiro JUVENAL DE MACEDO FILHO, pelas importantes sugestões apresentadas nesta Tese e pelo muito que me orientou sobre os problemas ligados à Engenharia de Infra-estrutura de Aeroportos.

- Ao Major Engenheiro JOSÉ ARESTIDES DE ARAÚJO, pelo inestimável apoio dado, principalmente na fase inicial deste trabalho.

- A todos os FUNCIONÁRIOS CIVIS E MILITARES DA SEÇÃO DE LABORATÓRIO CENTRAL DE INFRA-ESTRUTURA da Diretoria de Engenharia da Aeronáutica, pela importante colaboração prestada durante o desenvolvimento deste trabalho, principalmente à EQUIPE DE TOPOGRAFIA E DESENHO.

- Ao Desenhista CAPISTRANO JOSÉ DE LIMA, pela dedicação e excelentes desenhos.

- À VARA RAMOS RIBEIRO, não só pela primorosa composição e montagem final deste trabalho, mas por transmitir, sempre, mensagens especiais de esperança e de conforto nos momentos difíceis.

## S I N Ó P S E

*Apresentação do problema da interação AERONAVE — PAVIMENTO e de critérios de avaliação das irregularidades superficiais do pavimento. Estudo comparativo inicial com o rugosímetro B P R das pistas de pouso de dois Aeródromos Militares. Nivelamento topográfico de metro em metro, seguindo alinhamentos longitudinais, e análise dos dados por via gráfica com uso de gabarito e por abordagem estatística. Por esses métodos pode-se definir os trechos de irregularidades excessivas e os de transição para os de níveis aceitáveis; coincidentemente com as indicações dos pilotos.*

\* \* \*

## A B S T R A C T

Interaction airplane - pavement and criteria for pavement surface unevenness evaluation is presented. An initial study with the B P R roughmeter in two Military Aerodrommes is presented. Topographic levelling of points one meter from each other and data analysis either through drafted profiles and special template or using a statistical approach. These procedures permit to detect areas of excessive irregularities and the transition areas to those of acceptable unevenness, in connection with pilot's experience.

\* \* \*

## S U M Á R I O

	Página
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO -----	01
CAPÍTULO II - REVISÃO DE LITERATURA	
II.1 - O conceito de irregularidades de superfície de pavimentos -----	03
II.2 - Causas das irregularidades de superfície dos pavimentos -----	03
II.3 - Conseqüências das irregularidades de superfície de pavimentos -----	04
II.4 - Interação AERONAVE x PAVIMENTO -----	05
II.4.1 - Aceleração vertical -----	06
II.4.2 - Relações de transferência de energia -----	11
II.5 - Métodos usuais de avaliação de irregularidades de superfície de pavimentos de pistas de pouso -----	12
II.5.1 - Técnicas de DENSIDADE ESPECTRAL, a partir de dados obtidos com levantamento topográfico -----	12
II.5.2 - Análise direta dos perfis obtidos com nivelamento topográfico geométrico -----	14
II.5.3 - Avaliação das irregularidades através da análise direta dos dados obtidos no nivelamento -----	15
II.6 - Outros aspectos de interesse -----	17
CAPÍTULO III - ASPECTOS TEÓRICOS, INTERAÇÃO DA AERONAVE COM O PAVIMENTO, O PROBLEMA DE RESSONÂNCIA, RELAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA	
III.1 - Aspectos Teóricos -----	20
III.1.1 - Tipos de movimentos unidimensionais de corpos rígidos -----	20



	Página
III.1.2 - Propriedades do movimento oscilatório -----	22
III.1.3 - Vibrações ao acaso (randômicas) -----	24
III.2 - Interação da aeronave com o pavimento e o problema de ressonância -----	27
III.2.1 - Características de respostas das aeronaves -----	27
III.2.2 - Aplicação do movimento harmônico simples e estado de constante vibração (ressonância) -----	27
III.3 - Relações de transferência de energia -----	31
CAPÍTULO IV - MATERIAIS E MÉTODOS -----	34
CAPÍTULO V - ESTUDOS DE RUGOSIDADE FEITOS COM O RUGOSÍMETRO TIPO B P R ( <i>Bureau of Public Roads</i> ) DA COPPE - UFRJ -----	42
CAPÍTULO VI - ESTUDOS DE IRREGULARIDADES DESENVOLVIDOS A PARTIR DO NIVELAMENTO TOPO - GRÁFICO GEOMÉTRICO, FEITO DE METRO EM METRO -----	65
VI.1 - Espaçamento adotado -----	66
VI.2 - Estudos das BACIAS encontradas no desenho dos perfis topográficos geométricos -	67
VI.3 - Metodologia adaptada e desenvolvida para análise dos perfis topográficos geométricos -----	76
VI.3.1 - Emprego de um GABARITO de 1,20 m de comprimento por 3,0 cm de altura -----	80
VI.3.2 - Análise direta dos dados através do cálculo dos desvios padrões para cada 120 m de pista -----	83
CAPÍTULO VII - ESTUDOS SOBRE INTERAÇÃO DAS AERONAVES F-5B e F-5E COM O PAVIMENTO NOS PRIMEIROS 800 m EM CONCRETO CIMENTO DA PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE ...	

	Página
CAPÍTULO VII - ... SANTA CRUZ (RJ), A PARTIR DA CA- BECEIRA 22	
VII.1 - Estabelecimento do problema	119
VII.2 - Metodologia empregada -----	120
VII.3 - Estudos da interação aerona- ves F-5B e F-5E com o pavi- mento. O problema de resso- nância -----	133
 CAPÍTULO VIII - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS ---	 137
 CAPÍTULO IX - CONCLUSÕES E SUGESTÕES	
IX.1 - Conclusões -----	153
IX.2 - Sugestões -----	155
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	 156

## CAPÍTULO I

## I N T R O D U Ç Ã O

A qualidade da superfície de rolamento de uma pista de pouso é assunto de interesse de engenheiros projetistas de infra-estrutura aeroportuária, engenheiros de manutenção, projetistas de aeronaves, pilotos e passageiros. Envolve questões de segurança e conforto nas operações de pouso e decolagem, assim como problemas estruturais da aeronave devido às vibrações induzidas pela interação aeronave - pavimento.

A detecção de áreas críticas das pistas quanto a níveis de irregularidades que causem os inconvenientes e perigos mencionados é, portanto, do maior interesse.

Nos países de fartos recursos tecnológicos a medição das irregularidades, na sua gama de diferentes valores e frequências de ocorrência, é feita por sofisticados equipamentos capazes de fornecer rapidamente, com o emprego do sistema A/D - analógico/digital - a decomposição do perfil nos seus diversos comprimentos de onda e de métodos de análise especiais.

A qualidade inicial da superfície, quanto à lisura, vem sendo controlada entre nós pelo emprego da tradicional régua de 3 metros de comprimento, tolerando-se depressões ou irregularidades de até 5 mm. A evolução das aeronaves convencionais para jatos de maior velocidade e maior peso de decolagem, passou a exigir melhor qualidade de rolamento ao lado de qualidade estrutural convenientemente determinada. A interação pavimento - aeronave tornou-se um problema mais complexo face, também, às pressões de pneus, geometria de trem de pouso e solicitação dinâmica intensa das estruturas dos pavimentos.

As insistentes reclamações de pilotos de aeronaves militares de caça dos tipo F-5B e F-5E quanto às condições de rolamento da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), deram origem a um trabalho que veio a constituir o objeto desta Tese de Mestrado.

A inexistência de registros de experiência anterior no Brasil, quanto à avaliação e solução de problemas de irregulari

dades de superfícies, a ponto de interferir na operação de aeronaves militares, foi o primeiro desafio do trabalho empreendido.

A primeira idéia que ocorreu, inspirada na experiência rodoviária, foi o estudo comparativo de irregularidades com o equipamento rugosímetro B P R, da UFRJ, da pista de Santa Cruz e de outra cujo desempenho era tido como satisfatório, no caso, a da Base Aérea de Canoas (RS).

Logo, porém, esta abordagem inicial se mostrou inadequada, o que recomendou um estudo mais aprofundado da questão da interação aeronave - pavimento.

O interesse de se desenvolver no país estudos de interação aeronave - pavimento é incontestável. Está em perigo a operação satisfatória das aeronaves, o conforto da tripulação e passageiros, a fadiga de alguns elementos estruturais e os danos causados a instrumentos elétricos e eletrônicos sensíveis no compartimento dos pilotos, todos estes aspectos se enquadram nas duas metas a atingir: SEGURANÇA e ECONOMIA.

\* \* \*

## CAPÍTULO II

REVISÃO DE LITERATURAII.1 O CONCEITO DE IRREGULARIDADES DE SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS

Rugosidade é o termo que se encontra com maior frequência, na bibliografia sobre o assunto. Entretanto, quando são feitos estudos dessa natureza em pistas de pouso, são consideradas muitas variáveis, tais como: pequenos, médios e grandes comprimentos de onda; amplitudes pequenas, médias e grandes; BACIAS ou recalques localizados, com áreas variáveis; de formações ocasionais, devido a interseções de pistas, etc. Sendo assim, a expressão que melhor se adaptaria, englobando todos esses aspectos, seria IRREGULARIDADES DE SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS, o que estaria plenamente de acordo com as afirmações de TUNG *et al* <sup>31,32</sup>.

A extensão desse problema é vasta, no que diz respeito aos enfoques e interesses de profissionais sob os quais pode ser abordado. Assim, é algo que preocupa a administradores e operadores de aeroportos, aos engenheiros de projeto e de execução e restauração de pistas, aos projetistas e operadores de aeronaves e, em última análise, de forma indireta, aos passageiros e usuários em geral. Esses aspectos são amplamente discutidos por GERARDI<sup>5</sup>, HALL & KOPELSON<sup>7</sup>, HOUBOLT<sup>12</sup>, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, MORRIS<sup>18</sup>, MORRIS & STICKLE<sup>20</sup> e YANG<sup>36</sup>.

II.2 CAUSAS DAS IRREGULARIDADES DE SUPERFÍCIE DOS PAVIMENTOS

Várias seriam as causas das irregularidades de superfície de pavimentos, podendo ter sua origem já na escolha do sítio, onde um solo de fundação de má qualidade, principalmente compressível, seria um grande potencial para o desenvolvimento de anormalidades na qualidade de superfície, além das condições

to a ser levado em conta, como sugere QUEIROZ<sup>24</sup>, ao analisar a qualidade de superfície de rolamento, numa das faixas por ele estudadas na pista de pouso do Aeroporto Internacional de Brasília (DF). Grandes cargas transportadas fora das aeronaves, normalmente na região das asas, como tanques, motores e mísseis, uso de maiores pressões de pneus, o aumento da velocidade de rolagem, são outras causas sugeridas por HOUBOLT<sup>12</sup>.

Esses aspectos são realçados, levando-se em consideração os relatos de HORONJEFF<sup>10</sup> e LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> de que a partir de 1935, época em que surgiu o DC-3, com capacidade de transporte de 20.000 libras e velocidade de 185 milhas por hora, até 1969, quando surgiram aeronaves do porte do BOEING - 747 e DOUGLAS DC - 10, houve um aumento de 3,2 vezes a velocidade e de 40 vezes a carga (aproximadamente 800.000 libras). Estendendo-se esse acréscimo até os dias do CONCORDE, a velocidade foi aumentada de 6,9 vezes.

Outras causas apresentadas por LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> são:

a) As tensões e deformações induzidas pelas aeronaves à estrutura quase elástica do pavimento ao rolarem sobre o mesmo.

b) O fato de uma aeronave passar sobre uma pequena irregularidade, numa velocidade capaz de fazê-la entrar em ressonância, levará, com a repetição de outras passagens e até com aeronaves mais pesadas, as irregularidades a evoluírem para uma conformação senoidal.

c) As cargas dinâmicas acentuam as irregularidades, podendo seus valores chegarem até 1,65 vezes a carga estática, o que TUNG *et al*<sup>31,32</sup> comprovaram experimentalmente. Essa última observação é corroborada também por LEDBETTER<sup>15</sup>.

d) Transferência de energia cinética para o pavimento na região de maiores sustentações das aeronaves, ou seja, de decolagem.

### II.3 CONSEQUÊNCIAS DAS IRREGULARIDADES DE SUPERFÍCIE DOS PAVIMENTOS

O efeito principal das irregularidades sobre a aeronave é quanto à vibração e acelerações verticais.

Quanto ao problema da vibração, discutir-se-á de forma mais ampla, no CAPÍTULO III, os seus conceitos básicos e apli-

cações, de acordo com THOMSON<sup>30</sup> e outros autores. Cabem, entretanto aqui, algumas considerações sobre resultados de pesquisas obtidos acerca do assunto.

Não faz sentido estudar-se as irregularidades, sem relacioná-las às aeronaves e, em última análise, ao passageiro e à tripulação. Dessa forma, a opinião subjetiva, principalmente dos pilotos, terá que ser levada em conta, pois eles é que sentirão os efeitos de forma mais acentuada.

A unanimidade dos trabalhos desenvolvidos mostra que a região da aeronave que sofre as maiores acelerações verticais é a cabine do piloto.

Com essas observações feitas, verifica-se que os estudos devem ser conduzidos de modo a se ter uma estreita relação entre causas e efeitos e, para isso, existem duas técnicas principais: INSTRUMENTAÇÃO DE AERONAVES, para estudar seu comportamento sobre uma pista, ou SIMULAÇÃO DE AERONAVES, cujos estudos são feitos com emprego de processos matemáticos mais complicados e dados dos perfis reais das pistas em computador (GERARDI<sup>5</sup>).

#### II.4 INTERAÇÃO AERONAVE COM PAVIMENTO

YANG<sup>36</sup> apresenta um amplo estudo teórico sobre o assunto, cujos principais tópicos por ele abordados são discutidos no CAPÍTULO III.

É consenso comum de vários autores, que existe um trinômio sobre o qual se apoia grande parte desses estudos. Trata-se de:

FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL DA AERONAVE *versus* VELOCIDADE DA AERONAVE *versus* COMPRIMENTO DE ONDA DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO. (HALL & KOPELSON<sup>7</sup>, HAAS & HUDSON<sup>8</sup>, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, MORRIS<sup>17 18</sup>, MORRIS & HALL<sup>19</sup> e YANG<sup>36</sup> ).

Quando esse trinômio se concretiza, as acelerações verticais das aeronaves se acentuam, sendo muito maior no compartimento do piloto, do que no centro de gravidade da aeronave e o fenômeno de ressonância se faz presente. Segundo YANG<sup>36</sup>, o fator de amplificação nas condições usuais, aumentaria a carga em cerca de 3 % do peso estático.

#### II.4.1 A ACELERAÇÃO VERTICAL

Com base em pesquisas desenvolvidas principalmente pela NASA, o limite de aceleração vertical aceitável na cabine do piloto é de  $\pm 0,4g$  ( $g$  = aceleração da gravidade). (GERARDI<sup>5</sup>, HORN<sup>9</sup>, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> e MORRIS & HALL<sup>19</sup>).

Grande parte dos estudos foram então conduzidos, considerando as irregularidades do perfil de uma pista como a FUNÇÃO FORÇA e ENTRADA (*input*) e as respostas da aeronave, seja em forma de frequência fundamental, de aceleração vertical na posição do piloto ou no centro de gravidade da aeronave, ou ângulo de inclinação, etc, à FUNÇÃO RESPOSTA (*output*). (GERARDI<sup>5</sup>, HALL & KOPELSON<sup>7</sup>, HORN<sup>9</sup>, SILSBY<sup>26</sup>, TUNG *et al*<sup>31 32</sup> e YANG<sup>36</sup>).

LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> afirmam que é necessário relacionar as irregularidades com a aceleração na cabine do piloto e reparar as áreas que produzem as acelerações indesejáveis. Chamam atenção para o fato de que pistas que são consideradas boas para aeronaves convencionais, podem não o ser para as mais rápidas, pesadas e modernas e que a frequência fundamental para caças leves está entre 2 e 3 cps.

Esses mesmos autores chegaram à expressão que correlaciona frequência de resposta com a massa da aeronave ( $\log m = -2,0 \log f + 3,35$ ), onde  $m$  é a massa em  $lb \times s^2 \times ft^{-1}$  e  $f$  a frequência em ciclos por segundo.

TUNG *et al*<sup>32</sup>, fazendo estudos comparativos entre uma aeronave subsônica 707 e um supersônico 733-94 da BOEING, a 59 nós de velocidade (nó = uma milha náutica por hora = 1852 m/h), no Aeroporto Internacional de São Francisco (USA), pista 10/28, verificou que a aceleração vertical de pico foi de 1,9g para o subsônico (B-707) e de 2,5g para o supersônico (B-733-94). Essas pesquisas mostraram que os valores para as respostas de pico são muito maiores para o supersônico pois, nesses mesmos estudos, constatou-se que a força dinâmica na perna principal do trem de pouso foi equivalente a 1,65 vezes a carga estática, e que no caso da bequilha, esses valores chegaram a 2,38 e 4,28 vezes o equilíbrio estático, respectivamente para o B-707 e B-733-94.

HALL & KOPELSON<sup>7</sup> obtiveram perfis reais de duas pistas com nivelamento topográfico de 2 em 2 pés e converteram para



sinais analógicos, gravando em fitas magnéticas. Simularam uma aeronave a várias velocidades e fizeram estudos detalhados para determinar o mínimo de reparos necessários, a fim de reduzir as respostas a níveis aceitáveis. Embora as pistas apresentassem densidades de potência espectral (*Power Spectral Density*) semelhantes, as respostas da aeronave para as duas pistas foram bem diferentes. Outras observações dos autores foram no sentido de que para maiores velocidades, as respostas de aceleração eram maiores. Para menores velocidades, maiores eram as inclinações na posição do piloto. A aeronave simulada representou um turbo-jato moderno de transportes, tendo inclinação e forma de translação de corpo rígido, não sendo considerado de forma flexível.

MORRIS<sup>17</sup> <sup>18</sup> ao estudar três pistas, através de perfis obtidos com nivelamento topográfico — de 2 em 2 pés, numa situação, e de 8 em 8 pés noutra — verificou que as respostas de aceleração vertical das aeronaves aumentaram também com a velocidade. As pistas — **A**, **B** e **C**, eram tidas como: **A** mais rugosa que **B**, e **C** a mais lisa, através da opinião dos pilotos que coincidiu com as análises feitas por meio de técnicas de densidade de potência espectral. Esses trabalhos foram desenvolvidos em duas etapas: a primeira para um jato de treinamento, a segunda para uma aeronave convencional de transporte (motor a pistão) e um turbo-jato.

No caso do jato de treinamento, a aceleração vertical foi maior no NARIZ do que no centro de gravidade da aeronave. Para o turbo-jato, o desvio padrão das acelerações verticais na cabine do piloto foi maior 45 a 110 % do que no centro de gravidade. Ainda para o turbo-jato, a relação entre os espectros das acelerações verticais e dos perfis das pistas não definiu uma única FUNÇÃO TRANSFERÊNCIA, que foi independente da amplitude de entrada e velocidade da aeronave.

MORRIS & HALL<sup>19</sup> afirmam que os estudos têm sido conduzidos mais para problemas de pilotagem, devido a irregularidades de pista e que tais problemas ocorrem mais na região de alta velocidade ou de decolagem e, ocasionalmente, durante a fase inicial do pouso. Para uma pista com excesso de irregularidades, além das acentuadas acelerações verticais, há pronunciadas inclinações, tornando difícil a leitura dos instrumentos, poden

do levar os pilotos a perderem o controle das aeronaves nos momentos mais críticos da decolagem ou do pouso.

MORRIS & STICKLE<sup>20</sup> estudaram os perfis topográficos de duas pistas de grama, uma mais LISA que a outra, e os compararam com o perfil obtido para uma pista de rolamento em concreto de cimento, construída dentro dos melhores padrões e considerada muito boa em termos de irregularidades, que, praticamente, funcionou como TESTEMUNHA. O espaçamento adotado foi de 2 pés nos três casos e os resultados mostraram que a pista mais rugosa apresentou um desvio padrão  $\sigma = 0,254$  pés (77,4 mm), a outra pista de grama  $\sigma = 0,066$  pés (20 mm) e o táxi  $\sigma = 0,016$  pés (4,9 mm). Os autores chamam atenção para o fato de que as operações de aeronaves sobre pistas e táxis com excesso de irregularidades, têm resultado em danos estruturais, rutura por fadiga e reclamações de pilotos e passageiros.

SILSBY<sup>26</sup> estudou analiticamente os efeitos de irregularidades de pista sobre aeronaves (simuladas) com várias configurações de trens de pouso para transportes supersônicos. Com emprego de computador digital, admitindo velocidades de 40, 80, 120, 160, 200 e 280 pés/s, comprimento de onda desde 4 pés até 570 pés (174,00 m), combinou os resultados das respostas das aeronaves com a densidade de potência espectral do perfil de uma pista considerada boa,  $\phi(\omega) = \frac{6,7 \times 10^{-6}}{\omega^2}$  (HOUBOLT<sup>12</sup>), ( $\omega$  = frequência espacial em rad/s), levando em conta as seguintes hipóteses:

a) A frequência natural de todos os pneumáticos era a mesma.

b) Os pneus não tinham amortecimento e possuíam uma relação carga - deflexão linear.

c) Todos os suportes tinham características de amortecimento e de mola e mesma frequência natural.

d) A estrutura da aeronave era rígida.

e) Ausência de forças aerodinâmicas.

A principal conclusão foi a de que os desvios padrões da aceleração vertical e do ângulo de inclinação, quando comparados a configurações de transportes subsônicos, eram 50 % maiores e que os desvios padrões dos deslocamentos verticais do supersônico eram 1,5 a 2,5 vezes maior que os encontrados para o subsônico.

HORN<sup>9</sup> distribuiu questionários a vários pilotos de bombardeiros B-52 e aeronaves tipo KC135 e, baseado nas informações colhidas, concluiu que pistas de quatro Bases Aéreas apresentavam irregularidades em excesso. Nessas condições, resolveu partir para estudos com o B-52 e um BOEING 727 instrumentados.

Os perfis topográficos das pistas foram obtidos a 9 pés (2,75m) de cada lado do eixo. As respostas das aeronaves foram avaliadas pelas acelerações verticais, em três locais da fuselagem e pela instalação de um acelerômetro angular na cabine do piloto, para medir aceleração de rotação e ângulo de inclinação.

Os modelos matemáticos consistiram em imaginar a aeronave:

a) como uma estrutura elástica, com vários graus de liberdade; e

b) como um corpo rígido, com três graus de liberdade: na inclinação, nos movimentos verticais e na translação horizontal, além de dois outros para levar em conta os movimentos do trem de pouso durante as operações no solo.

As respostas das aeronaves, em forma de aceleração vertical, obtidas através dos registros acumulados, foram a entrada no computador e por meio da TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER, foram transformadas do domínio do tempo para o domínio da frequência.

Foram feitas curvas com as frequências críticas *versus* velocidade, o que permitiu facilmente chegar aos comprimentos de onda críticos, ou seja:  $L_{crit} = \text{velocidade} / \text{frequência crítica}$ . Isso foi desenvolvido considerando-se, sempre, acelerações verticais críticas  $\geq \pm 0,4 g$ , que é o critério da U. S. AIR FORCE, considerando a vibração da aeronave como de um corpo rígido.

Afirma HORN<sup>9</sup> que, introduzindo certo grau de conservadorismo na análise, o nível de  $\pm 0,2 g$  foi selecionado como NÍVEL DE ACELERAÇÃO VERTICAL ACEITÁVEL para construção de novas pistas.

Verificou ainda, aquele pesquisador, que para o B-52, à velocidade de 75 nós, a frequência dominante encontrada para o critério de  $\pm 0,4 g$ , foi de 1 cps (ciclo por segundo). Con-

seqüentemente, a função força (irregularidades da pista) com uma excitação de 1 cps geraria a máxima resposta da aeronave.

O critério de LISURA, que controlaria a irregularidade da pista, seria de três naturezas:

- a) variações abruptas isoladas;
- b) variações abruptas periódicas; e
- c) variações não abruptas periódicas (senoidais).

Para LISURA no sentido transversal da pista, HORN<sup>9</sup> admite a recomendação do máximo desvio de 1/4 polegada (6 mm) para uma régua de 16 pés (4,88 m).

GERARDI<sup>5</sup> foi outro pesquisador que fez estudos comparativos entre dados obtidos com computador, simulando uma aeronave rolando sobre uma pista, considerando-a flexível, com movimento de rotação no centro de gravidade, translação, movimentos do trem de pouso, inclinação, etc, chegando a 30 graus de liberdade e resultados reais medidos com aeronaves nas pistas.

Para o estudo de computador, entrou com os dados reais dos perfis topográficos (nivelamento de 2 em 2 pés) como função força e os principais objetivos, considerando também o critério de  $\pm 0,4g$ , como limite de acelerações indesejáveis, foram:

- a) Análise da carga dinâmica no pavimento.
- b) Avaliação de áreas críticas para reparos de pistas.
- c) Avaliação da resposta dinâmica de novas aeronaves, como o CONCORDE e transportes supersônicos, etc.

Segundo GERARDI<sup>5</sup>, houve boa correspondência entre os resultados simulados e os medidos no campo. Assim, comprovou numa Base Aérea da Espanha, a identificação de uma área rugosa com aeronave KC-135, o mesmo ocorrendo na Tailândia, com um B-52 (400.000 libras), e verificou que houve apenas 6% de diferença no pico das acelerações verticais medidas. A resposta simulada para um F4-C, mostrou diferença de apenas 9% nas acelerações medidas no centro de gravidade da aeronave, ocorrendo o mesmo para um C-141 com diferença de 11% para os valores medidos.

Como uma das principais conclusões de GERARDI<sup>5</sup>, fica a possibilidade do emprego desse programa de computador, desenvolvido para estudos e identificação de locais ou áreas onde há necessidade de reparos, tornando seus custos mais reduzidos.

#### II.4.2 RELAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Este tópico será abordado de maneira mais ampla no CAPÍTULO III, mas alguns aspectos já merecem ser ressaltados, como por exemplo, as afirmações de LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> de que as análises de relações de energia ainda não são completas, embora reconheçam a possibilidade de transferência de energia ao pavimento, na forma de energia cinética. Parte dessa energia seria transformada em deformações não elásticas, calor, ruído e recuperação elástica (*rebound*). Como a infra-estrutura não é perfeitamente elástica para as cargas que lhe são impostas, depois de algumas repetições, os recalques serão inevitáveis.

Quando se comenta sobre relações de transferência de energia, não se pode deixar de lado as observações feitas por esses mesmos autores e principalmente HORONJEFF<sup>10</sup>, quanto à evolução das cargas e velocidades das aeronaves desde 1935 (época do DC - 3) até aos dias de hoje.

TUNG *et al*<sup>31 32</sup> chamam atenção para o fato de que na operação de uma aeronave sobre uma pista, tem-se que levar em conta tanto os efeitos das irregularidades isoladas, como os de um sistema mais estacionário de irregularidades. Afirmam que uma BACIA com comprimento de onda de 50 a 100 pés (15 a 30 m) pode causar grandes cargas dinâmicas e acelerações verticais na cabine do piloto. Já foram comentados estudos realizados por esses autores, nos quais constataram que a carga dinâmica na perna principal do trem de pouso, através de medições, chegou ao pico de 1,65 vezes o peso estático. Quanto a esse aspecto, LEDBETTER<sup>15</sup> diz que as cargas impostas por uma aeronave, em função das irregularidades de uma pista, podem ser acuradamente definidas para vários tipos de operações e verificou, com um BOEING 727 instrumentado, que as cargas dinâmicas foram da ordem de 1,2 vezes a carga estática, para um pavimento RELATIVAMENTE LISO e que a extrapolação desses dados para pistas com superfícies mais irregulares, poderia resultar em cargas muito maiores.

YANG<sup>36</sup> faz alusões ao estado permanente de vibrações (vibrações forçadas) e chega por demonstrações ao fator de amplificação  $H$ , que depende da freqüência da FUNÇÃO FORÇA (representada pelas irregularidades da superfície do pavimento), das características de amortecimento e da freqüência fundamental do sis-

tema de resposta (função resposta), a aeronave.

A função transferência em termos de amplitude ao quadrado é representada pela expressão:

$$A^2(\omega) = \frac{\phi_o(\omega)}{\phi_h(\omega)} \quad (\text{HOUBOLT}^{12}, \text{HOUBOLT et al}^{13}, \text{MORRIS}^{18} \text{ e YANG}^{36})$$

onde:

$A^2(\omega)$  = função transferência da amplitude ao quadrado

$\phi_o(\omega)$  = espectro de saída (aceleração vertical da aeronave, função resposta)

$\phi_h(\omega)$  = espectro de entrada (função força, representada pelas irregularidades de superfície do pavimento)

## II.5 MÉTODOS USUAIS DE AVALIAÇÃO DE IRREGULARIDADES DE SUPERFÍCIE DE PAVIMENTOS DE PISTA DE POUSO

O início da avaliação de irregularidades de superfície de pista de pouso nos E.U.A. e possivelmente em todo o mundo, se deu na década de 50, conforme está patente nos trabalhos de HOUBOLT<sup>12</sup>, HOUBOLT et al<sup>13</sup>, THOMPSON<sup>29</sup>, WALLS et al<sup>34</sup> etc, todos eles fazendo uso da análise espectral a partir dos perfis topográficos.

### II.5.1 TÉCNICAS DE DENSIDADE ESPECTRAL A PARTIR DE DADOS OBTIDOS COM NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO

Este tópico será bastante discutido no CAPÍTULO VI, com base principalmente nos trabalhos de HOUBOLT<sup>12</sup>, para desenvolvimento teórico da metodologia que será descrita naquele CAPÍTULO.

#### a) INTERVALO DE AMOSTRAGEM

Desde o trabalho de WALLS et al<sup>34</sup>, feito em 1954, a maioria dos autores vem adotando o espaçamento de 2 pés. Na pesquisa conduzida por WALLS et al<sup>34</sup>, adotaram este intervalo de amostragem com base em:

19) Era esperada uma pequena variação nas cotas ou irregularidades para comprimentos menores do que 4 pés.

29) O teorema de amostragens em sistemas de comunicação, estabelece que uma PERTURBAÇÃO fica completamente especificada, para o menor comprimento de onda, quando o intervalo de amostragem corresponde à metade desse comprimento de onda.

Em termos de frequência espacial, isso corresponderia a  $\pi/2$  rad/s, ou seja:

$$\frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2} = \frac{3,14}{2} = 1,57 \text{ rad/s}$$

#### b) COMPRIMENTOS MÁXIMOS DE ONDAS

Em quase todos os trabalhos, o maior comprimento de onda considerado de interesse, tem sido de 300 pés. Ainda na década de 50, um dos métodos empregados para eliminar ondas maiores do que 300 pés era o de médias móveis (WALLS *et al*<sup>34</sup>).

Modernamente, podem ser empregadas técnicas de filtragem (*cutoff*) como HIGH PASS FILTERING TECHNIQUE (SONNENBURG<sup>27</sup>), embora este mesmo autor tenha usado essa técnica para eliminar ondas maiores do que 400 pés (120,00 m), com mesmo espaçamento (2 pés), e MORRIS<sup>17</sup> tenha trabalhado com ondas de até 640 pés (195 m) e espaçamento de 8 pés (2,45 m).

Em termos de frequência espacial ou reduzida, esses comprimentos seriam:

$$\frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi}{300} = \frac{\pi}{150} = 0,02 \text{ rad/s}$$

ou

$$\frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi}{400} = \frac{\pi}{200} = 0,016 \text{ rad/s}$$

ou

$$\frac{2\pi}{L} = \frac{2\pi}{640} = \frac{\pi}{320} = 0,01 \text{ rad/s}$$

Segundo HOUBOLT *et al*<sup>13</sup>, o uso da análise de potência espectral é um método conciso de apresentar as características

de irregularidades de uma pista, com vários componentes de frequência. Para MORRIS & HALL<sup>19</sup> apresenta a desvantagem de não distinguir os efeitos de muitas bacias de pequenas amplitudes, de poucas com grandes amplitudes, não indicando também, as zonas de importância ao longo da pista, mas ainda se constituindo num método de apresentar a irregularidade média da pista.

A principal propriedade da potência espectral é que a área limitada abaixo da curva, obtida entre dois extremos de comprimentos de onda ou de frequência, corresponde à variância ( $\sigma^2$ ). Com isso, pode-se expressar as irregularidades de trechos de uma pista, através de seu desvio padrão. (HOUBOLT<sup>12</sup>, YANG<sup>36</sup>, etc). Segundo estes mesmos autores, a curva obtida para o *power spectrum*  $\phi(\omega)$  pode ser representada pela curva:

$$\phi(\omega) = \frac{c}{\omega^n}, \text{ sendo } c \text{ e } n \text{ constantes.}$$

HOUBOLT<sup>12</sup> encontrou para uma pista comercial considerada boa, a curva  $\phi(\omega) = \frac{6,7 \times 10^{-6}}{\omega^2}$ .

YANG<sup>36</sup> encontrou para a pista do Aeroporto de Newark  $\phi(\omega) = \frac{11 \times 10^{-6}}{\omega^2}$  e para a do Aeroporto de Kennedy  $\phi(\omega) = \frac{86 \times 10^{-6}}{\omega^{1/3}}$ .

( $\omega$  = frequência espacial ou reduzida em rad/s)

## II.5.2 ANÁLISE DIRETA DOS PERFIS OBTIDOS COM NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO

Quanto ao espaçamento, são válidas as mesmas considerações apresentadas no item II.5.1, acrescentando-se ainda observações feitas por QUEIROZ<sup>25</sup>, de que para países em desenvolvimento, o nivelamento topográfico geométrico é um recurso altamente interessante, eliminando inclusive a necessidade de importação de equipamentos sofisticados. Reconhece ainda esse pesquisador que, no estado atual de conhecimento, as medidas dos perfis de pavimentos (irregularidades) com nível e mira, constituem o mais viável meio de transferência de padrões de irregularidades.

A análise de perfis topográficos pode começar pela inspeção visual, para localização de áreas RUGOSAS ou BACIAS (HALL & KOPELSON<sup>7</sup>). Extensas considerações sobre perfis topográficos



geométricos serão feitas no CAPÍTULO VI.

Quanto ao número de linhas e posições das mesmas no sentido longitudinal da pista, tem variado de uma a duas, no eixo e próximo do eixo, desde poucos centímetros até 2,75 m.

YANG<sup>36</sup> trabalhou com dois perfis na pista de pouso dos Aeroportos de Newark e Kennedy, um a cada 1 pé (30,48 cm) do eixo. HORN<sup>9</sup>, por sua vez, utilizou dados de dois perfis, um a cada 9 pés (2,75 m) do eixo.

Quanto a esses aspectos, HOSANG<sup>11</sup>, estudando a distribuição lateral de 4 359 decolagens e 5 200 pousos, evidenciou que 75 % das operações eram dirigidos para a faixa central de, aproximadamente, 8 m da pista.

### II.5.3 AValiação das Irregularidades Através da Análise Direta dos Dados Obtidos no Nivelamento

O principal trabalho desenvolvido com esse enfoque, foi o de SONNENBURG<sup>27</sup>. Afirma que os métodos estatísticos têm se mostrado lógicos e utilizáveis para quantificação de irregularidades de pista, pois eliminam a necessidade de se modelar uma aeronave e estender conclusões sobre propriedades de resposta dinâmica para taxas de qualidade de rolamento de forma subjetiva. Em geral, as técnicas que envolvem resposta de aeronaves incluem tanto métodos de respostas estruturais, como humanas e daí não se poder identificar exatamente, no campo, os locais de maiores irregularidades. Nesse sentido, o método de análise estatística direta dos dados de perfis topográficos de pista é bem superior.

SONNENBURG<sup>27</sup> estudou perfis de 21 pistas, obtendo desvios padrões para a menos rugosa de  $\sigma = 0,11415$  polegadas (2,89941 mm), para a mais rugosa  $\sigma = 0,52756$  polegadas (13,40002 mm), ficando a média em torno de  $\sigma = 0,27882$  polegadas (7,08203 mm).

Esse pesquisador afirma ainda que os métodos indiretos servem apenas para avaliar a eficácia de um plano de reparos, enquanto que a metodologia direta permite um detalhamento de onde estão ocorrendo as áreas que necessitam reparos.

O método de SONNENBURG<sup>27</sup> preconiza a filtragem dos dados do perfil, eliminando-se ondas maiores do que 4 0 0 p é s

(120,00 m). A técnica por ele utilizada foi a de HIGH-PASS FILTERING TECHNIQUE, que implica na eliminação de baixas frequências (comprimentos de onda maiores que certos limites). Com as técnicas empregadas, ao se colocar as distâncias da pista nas abcissas, e nas ordenadas, apenas os dados FILTRADOS em escala maior conduzirão, facilmente, a identificar os picos correspondentes a locais mais RUGOSOS.

O valor do desvio padrão ( $\sigma$ ) vai depender do CORTE (*cut off*) do comprimento de onda máximo escolhido e por isto a seleção para filtragem de longos comprimentos de ondas deve ser racional. Para isso é necessário:

1º) A frequência da FUNÇÃO FORÇA (irregularidades do perfil) para velocidades apropriadas das aeronaves não deverá excitar a forma fundamental de vibração das aeronaves.

2º) Uma variação substancial na filtragem (*cutoff*) do comprimento de ondas, isto é, na limitação do comprimento máximo, não variará significativamente os valores dos desvios padrões ( $\sigma$ ).

Numa distribuição normal, 99,6 % dos dados estão compreendidos na faixa de  $\bar{x} \pm 3\sigma$  ( $\bar{x}$  = média e  $\sigma$  = desvio padrão). Nos estudos de SONNENBURG<sup>27</sup> isso não ocorreu, pois  $3\sigma$  era igual a 0,32066 polegadas e havia quatro pistas com desvios padrões a cima desse limite (aproximadamente 20 %). Verificou-se, então, que o terceiro momento estatístico,  $\beta_3$ , era igual a 1,64, demonstrando-se que a curva tinha uma cauda maior para a direita, com assimetria acentuada. Do mesmo modo, constatou-se que o quarto momento,  $\beta_4$ , era de 3,21, o que demonstrava ser a curva do tipo LEPTOCÚRTICA, isto é, ponteaguda.

Com essas observações SONNENBURG<sup>27</sup> não tomou o desvio padrão médio da pista a partir do segundo momento estatístico, isto é,  $\sigma = \sqrt{\mu_2}$ , e sim a partir da média das variâncias das 21 pistas, ou seja:  $\bar{\sigma} = \sqrt{\bar{\mu}_2}$ , obtendo então  $\bar{\sigma} = 0,279$  polegadas.

Admitiu esse autor que a melhor distribuição de seus perfis seria do tipo  $\chi^2$  e que a função densidade para  $\mu^2$  seria:

$$f(\mu_2) = \frac{1}{\Gamma\left(\frac{K-1}{2}\right)} \left(\frac{K}{2\sigma^2}\right)^{\frac{K-1}{2}} (\mu_2)^{\frac{K-3}{2}} e^{-\left(\frac{K\mu_2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (\text{II-1})$$

onde:

$\Gamma$  = função gama

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\bar{\mu}_2}$$

K = número total de perfis

De (II-1) chegou às expressões:

$$\sigma' = \bar{\sigma} \left( 1 + \frac{\sqrt{2K}}{K} \right)^{1/2} = 0,31895 \text{ polegadas} \quad (\text{II-2})$$

$$\sigma'' = \bar{\sigma} \left( 1 + \frac{2\sqrt{2K}}{K} \right)^{1/2} = 0,35457 \text{ polegadas} \quad (\text{II-3})$$

$$\sigma''' = \bar{\sigma} \left( 1 + \frac{3\sqrt{2K}}{K} \right)^{1/2} = 0,38692 \text{ polegadas} \quad (\text{II-4})$$

onde K representa o número de perfis estudados (21).

Com esses valores, baseado na distribuição  $\chi^2$  chegou aos limites abaixo:

Pista com irregularidades aceitáveis	→ → → →	$\sigma \leq 0,32 \text{ pol (8,13 mm)}$
Pista em FAIXA DE TRANSIÇÃO	→ → → →	$\sigma \leq 0,36 \text{ pol (9,15 mm)}$
Pista com irregularidades em excesso	→ → → →	$\sigma > 0,36 \text{ pol (9,15 mm)}$

## II.6 OUTROS ASPECTOS DE INTERESSE

Praticamente não se encontra referências a estudo de irregularidades de pista de pouso, com o emprego do rugosímetro tipo B P R (BUREAU OF PUBLIC ROADS). Entretanto, esporadicamente, há citações sobre o perfilômetro de rodas múltiplas do TRRL (TRANSPORTATION AND ROAD RESEARCH LABORATORY), inclusive pela International Civil Aviation Organization — (ICAO)<sup>14</sup> que apresenta classificações de índices de rugosidade para pistas de pouso, com base nesse equipamento, como: muito bom, bom, regular, ruim e muito ruim.

HAAS & HUDSON<sup>8</sup> encontraram uma correlação entre medidas de rugosidade feitas com o rugosímetro tipo B P R e o perfi-

lômetro de Rodas Múltiplas. Aliás, esses autores fazem boa descrição desses equipamentos e de suas técnicas de manuseio, que podem ser ainda complementadas pelos trabalhos de BARBOSA & AREIAS NETTO<sup>1</sup> e VISSER & QUEIROZ<sup>33</sup>.

Segundo HAAS & HUDSON<sup>8</sup>, as principais limitações do rugosímetro tipo BPR são: baixa velocidade de operação (20 mph = 32 km/h), atenuação dos comprimentos de onda, dificuldades com repetibilidade e constante necessidade de calibração.

Outro aspecto que merece atenção, é o fato de que muito se tem feito em termos de irregularidades de pista de pouso, sem maiores preocupações com a pista de rolamento (táxi), onde se dispende o maior tempo com operações das aeronaves no solo.

Pelo menos dois autores enfocam esse problema. HOU-BOLT<sup>12</sup> diz que numa operação de decolagem, 80% do tempo é gasto no taxiamento (aproximadamente 4 minutos no táxi e 1 minuto na decolagem) e que as pistas de rolamento são muito mais RUGOSAS do que as de pouso e, segundo esse autor, este fato parece ser o maior contribuidor para o problema de fadiga.

O'MASSEY<sup>23</sup>, da Douglas Aircraft Co., analisando as fontes de vibração de uma aeronave, mostra que são dispendidos 0,8 minutos para um pouso, 1 a 5 minutos para uma decolagem e de 5 a 15 minutos no taxiamento. Essas observações vêm ao encontro das preocupações apresentadas por HOU-BOLT<sup>12</sup>.

O'MASSEY<sup>23</sup> ainda afirma que, do ponto de vista de projeto de aeronaves, somente BACIAS com amplitude de 4,5 polegadas (11,4 cm), ou mais, em 100 pés (30,5 m) podem levá-las a uma carga além daquelas previstas em projetos, o que parece contrariar, de certa forma, a opinião de todos os autores que foram consultados.

Esse mesmo autor conduziu estudos com *power spectral density* como função da frequência para resposta de aceleração de uma aeronave DC-8-63, pelas seguintes razões:

1a.) Reclamações de pilotos, por 3 anos, de que durante a decolagem eram acesas luzes de advertência nos painéis das aeronaves.

2a.) Exceto para pequenas ruturas localizadas no trem de pouso, não houve danos estruturais por fadiga devido a operações em pista RUGOSA.

As conclusões de O'MASSEY<sup>23</sup> foram as seguintes: As irre

gularidades de pista são toleradas pelas aeronaves, sem incorrer em dados por fadiga. Isso, segundo ele, não seria endosso para pistas RUGOSAS, mas somente uma forma de colocar o problema em perspectiva. Diz ainda que as irregularidades de pista são altamente questionáveis, devido aos danos causados aos instrumentos e equipamentos eletrônicos sensíveis, perturbação do piloto e segurança do passageiro.

Pode-se considerar incompleto e algo contraditório esse enfoque.

\* \* \*

## CAPÍTULO III

ASPECTOS TEÓRICOS  
 INTERAÇÃO DA AERONAVE COM O PAVIMENTO  
 O PROBLEMA DE RESSONÂNCIA  
 RELAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

III-1 ASPECTOS TEÓRICOS

Ao se estudar as condições de superfície de um pavimento, é necessário conhecer como as mesmas poderão interferir ou se relacionar aos veículos que rolarão sobre o pavimento em questão.

Em se tratando de pistas de pouso, aeronaves de diferentes portes responderão de modo diferente a um mesmo perfil de irregularidades de determinada pista (LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>), ou como afirma YANG<sup>36</sup> a resposta de uma aeronave pode variar para uma mesma superfície de pavimento, dependendo da velocidade e das características da aeronave.

Para o início desses estudos, tornam-se necessárias rápidas considerações sobre movimento oscilatório e, principalmente, movimentos unidimensionais de corpos rígidos.

Há duas classes gerais de vibrações, uma LIVRE e outra FORÇADA. Esta ocorre sob excitação de forças externas. Se a excitação é oscilatória, o sistema é obrigado a vibrar na frequência da excitação. Se essa frequência coincide com uma das frequências naturais do sistema, isto resulta num estado de RESSONÂNCIA, podendo evoluir para oscilações perigosas (THOMSON<sup>30</sup>).

Grau de liberdade é o número de coordenadas independentes necessárias para a descrição do movimento de um sistema.

III-1.1 TIPOS DE MOVIMENTOS UNIDIMENSIONAIS DE CORPOS RÍGIDOSa) Movimento harmônico

Quando o movimento se repete a intervalos iguais de tempo  $T$ , ele é dito PERIÓDICO. A frequência de oscilação é

o inverso do período  $T$ .

$$f = \frac{1}{T} \text{ ou } T = \frac{1}{f}, \text{ sendo } f \text{ a frequência.}$$

Se o movimento é representado pela função de tempo  $x(t)$ , qualquer movimento periódico deve satisfazer a relação  $x(t) = x(t + T)$ .

O MOVIMENTO HARMÔNICO é a forma mais simples de movimento periódico. É apresentado na FIGURA III-1, onde:

$A$  = deslocamento máximo da posição média (amplitude)

$\omega$  = frequência angular

$T$  = período

$2A$  = dupla amplitude

Quando  $t = T$  o movimento é repetido.

$$x = A \sin 2\pi \frac{t}{T} \quad (\text{III-1})$$

$x$  = deslocamento

$$f = \frac{\omega}{2\pi}, \text{ sendo } f \text{ em ciclo por segundo (HERTZ) e } \omega \text{ em rad/s}$$

Como o período é o inverso da frequência

$$T = \frac{1}{f} \rightarrow T = \frac{2\pi}{\omega} \rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ e substituindo em III.1}$$

vem:

$$x = A \sin \omega t \quad (\text{III-2})$$

b) Movimento periódico complexo de período  $T$

(Vide FIGURA III-2)

c) Movimento transiente

(Vide FIGURA III-3)

d) Movimento ao acaso (randômico)

Num sentido determinista, os valores instantâneos são imprevisíveis em qualquer tempo.

Os conceitos de amplitude e distribuição de frequência são de grande importância. Essas quantidades, na vibração aleatória, são representadas por valores médios estimados estatisticamente, como a raiz média quadrática e a média quadrática da densidade espectral (THOMSON<sup>30</sup>).

(Vide FIGURA III-4)

### III-1.2 PROPRIEDADES DO MOVIMENTO OSCILATÓRIO

As duas propriedades mais simples do movimento oscilatório são o VALOR PICO e o VALOR MÉDIO.

O valor pico indica o esforço máximo a que está submetida a parte vibrante e estabelece também um limite na exigência do ESPAÇO DE TREPIDAÇÃO (THOMSON<sup>30</sup>).

O valor médio indica um valor estável ou estático e pode ser determinado pela integração

$$\bar{x} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (\text{III-3})$$

O valor médio para um ciclo completo de uma onda senoidal, A sen t, é zero, enquanto seu valor médio para um meio ciclo é:

$$\bar{x} = \frac{A}{\Pi} \int_0^{\Pi} \text{sen } t \, dt \quad (\text{III-4})$$

$$\bar{x} = \frac{A}{\Pi} \left[ -\cos t \right]_0^{\Pi}$$

$$\bar{x} = \frac{A}{\Pi} \left[ (-\cos \Pi) - (-\cos 0) \right]$$

$$\bar{x} = \frac{A}{\Pi} \left[ 1 + 1 \right]$$

$$\bar{x} = \frac{2}{\Pi} \times A \quad (\text{III-5})$$

Valor médio para meio ciclo de onda senoidal



Figura III-1 Movimento harmônico simples

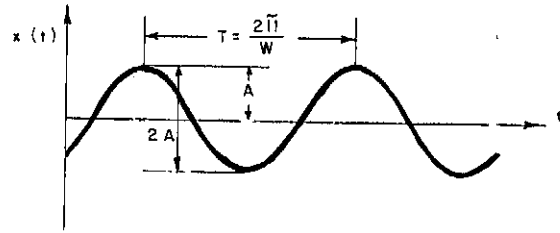


Figura III-2 Movimento periódico complexo

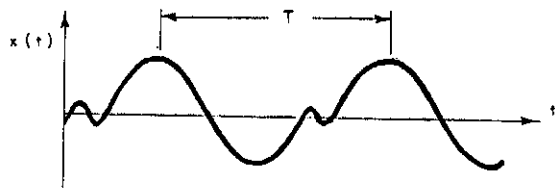


Figura III-3 Movimento transiente

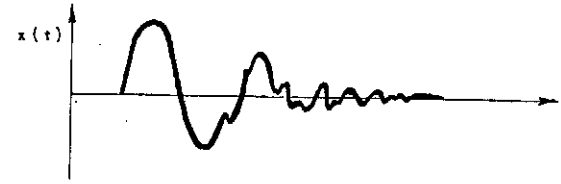
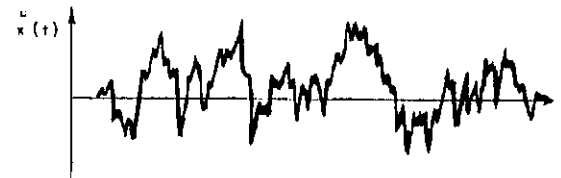


Figura III-4 Movimento ao acaso



### III-1.3 VIBRAÇÕES AO ACASO (randômicas)

O VALOR QUADRÁTICO MÉDIO de uma função de tempo  $x(t)$  é determinado pela média dos valores quadráticos, integrados nos limites de algum intervalo de tempo T:

$$\overline{x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad (\text{III-6})$$

Da equação (III-2)

$$\overline{x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A^2 \sin^2(\omega t) dt \quad (\text{III-7})$$

$$\overline{x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A^2}{T} \int_0^T \sin^2(\omega t) dt$$

$$\overline{x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A^2}{T} \times \left[ \frac{t}{2} - \frac{\sin 2\omega t}{4\omega} \right]_0^T$$

$$\overline{x^2} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A^2}{T} \times \left[ \left( \frac{T}{2} - \frac{\sin 2\omega T}{4\omega} \right) - \left( \frac{0}{2} - \frac{\sin 2\omega \times 0}{4\omega} \right) \right]$$

(Quando  $T \rightarrow \infty$ ,  $\omega \rightarrow 0$ )

$$\overline{x^2} = \frac{A^2}{2\pi} \times \left( \frac{2\pi}{2} \right)$$

$$\overline{x^2} = \frac{A^2}{2} \quad (\text{III-8}) \quad \text{e daí:}$$

$$\overline{x} = \frac{A}{\sqrt{2}} \quad (\text{III-9}), \text{ sendo:}$$

A = amplitude

$\sqrt{2}$  = FATOR DE FORMA PARA ONDA SENOIDAL PURA

$\overline{x}$  = desvio médio vertical

Quando uma aeronave se desloca sobre a superfície de um pavimento, as irregularidades causarão vibrações. Neste caso, elas são a função força do sistema de vibração e a aeronave corresponde à função resposta.

Segundo YANG<sup>36</sup>, do ponto de vista de análise dinâmica, as irregularidades do pavimento constituem um tipo de vibração de múltipla frequência, que assume comprimento de onda e amplitudes irregulares.

Por analogia à expressão (III-2) a força harmônica é representada pela expressão:

$$F = F_0 \text{ sen } (\omega t) \quad (\text{III-10})$$

e o seu valor quadrático médio será

$$\overline{F^2} = \frac{1}{T} \int_0^T F_0^2 \text{ sen}^2 (\omega t) dt,$$

$$\overline{F^2} = \frac{1}{\frac{n}{\omega}} \int_0^n F_0^2 \text{ sen}^2 (\omega t) dt, \text{ ou:}$$

$$\overline{F^2} = \frac{\omega}{n} \int_0^n F_0^2 \text{ sen}^2 \omega t dt \quad (\text{III-11}) \text{ e}$$

$$\overline{F^2} = \frac{F_0^2}{2} \quad (\text{III-12}) \quad \text{ou} \quad \overline{F} = \frac{F_0}{\sqrt{2}}$$

Para uma função de múltipla frequência, o QUADRADO MÉDIO da força é a somatória do quadrado das amplitudes de todas as frequências dividido por 2.

$$\overline{F^2} = \sum^n \frac{F_n^2}{2} \quad (\text{III-13})$$

A representação estatística da função resposta pode ser vista na FIGURA III-4 e a função força (de múltipla frequência) na FIGURA III-5.

Quando o intervalo de frequência é pequeno, o limite do valor do quadrado médio do segmento de frequência é definido como DENSIDADE DE POTÊNCIA ESPECTRAL. Para uma função contínua, representada na FIGURA III-6, seu valor é:

$$\overline{F^2} = \int_0^\omega \varnothing(\omega) d\omega \quad (\text{III-14})$$

$$\varnothing(\omega) = \text{função de múltipla frequência}$$

Figura III-5 Caracterização de vibrações randômicas (forças harmônicas de múltipla frequência.)

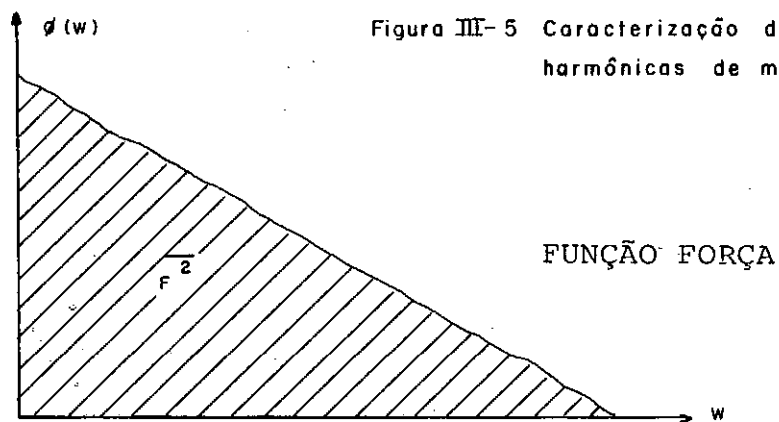


Figura III-6 Representação de uma função contínua de múltipla frequência.

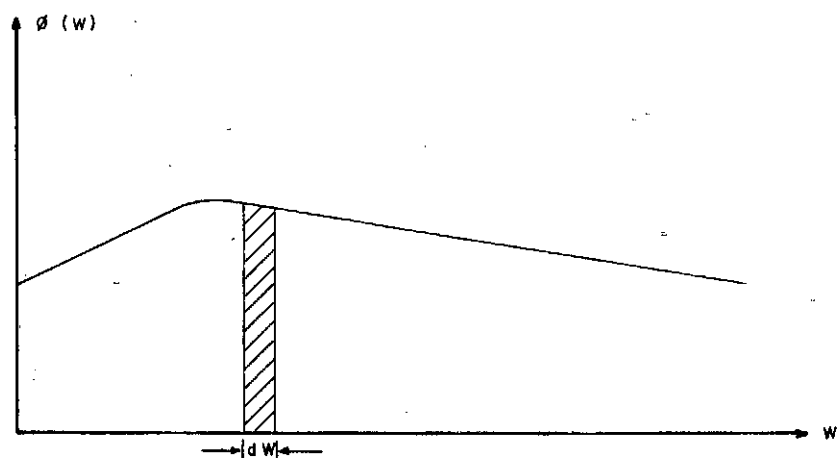
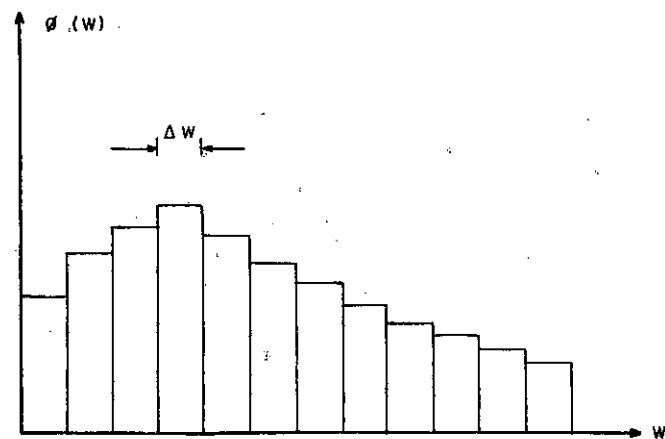


Figura III-7 Representação de uma função discreta de múltipla frequência.



### III-2 INTERAÇÃO DA AERONAVE COM O PAVIMENTO E O PROBLEMA DE RESSONÂNCIA

#### III-2.1 CARACTERÍSTICAS DE RESPOSTAS DAS AERONAVES

Com o surgimento de aeronaves a jato mais pesadas e mais rápidas, pistas que eram consideradas satisfatórias para operação de aeronaves convencionais (motores a pistão) passaram a mostrar acelerações indesejáveis nas cabines dos pilotos. A resposta de cada aeronave, como já foi visto, dependerá da velocidade, de sua frequência fundamental e da forma de irregularidades da superfície do pavimento (HAAS & HUDSON<sup>8</sup>, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>). Uma combinação desses três fatores resultaria na amplificação do movimento oscilatório de SOBE E DESCE da aeronave, atingindo o máximo de desconforto, em termos de aceleração vertical, na cabine dos pilotos. (HALL & KOPELSON<sup>7</sup>, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, MORRIS<sup>17, 18</sup>, MORRIS & HALL<sup>19</sup>, TUNG *et al.*<sup>31, 32</sup>).

Segundo LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, dados obtidos pela NASA, mostram que a frequência de resposta predominante é mais baixa para aeronaves mais pesadas e que isso, associado ao aumento das velocidades de decolagem, tem aumentado os comprimentos de onda que têm importância.

Os mesmos autores, bem como MORRIS & HALL<sup>19</sup>, mostram ainda, através de gráfico, a relação existente entre comprimentos de onda em pés, velocidade em nós e frequências de resposta em ciclos por segundo.

#### III-2.2 APLICAÇÃO DO MOVIMENTO HARMÔNICO SIMPLES E ESTADO CONSTANTE DE VIBRAÇÃO (RESSONÂNCIA)

O modelo mais simples para se ter idéia da vibração de uma aeronave, seria compará-la ao movimento harmônico simples de um sistema de molas, onde o tempo para completar uma oscilação completa, desprezando-se o atrito, seria sempre o mesmo, como pode ser visto na FIGURA III-8, onde:

A = amplitude máxima

F = força necessária ao sistema para produzir o deslocamento  $x$

Quando a amplitude é máxima, a aceleração ( $a$ ) é máxima.

Quando o deslocamento é nulo, a velocidade é máxima.

Pela Lei de HOOKE:

$$F = K x \quad (\text{III} - 15)$$

sendo:

$K$  = constante de proporcionalidade

A força restauradora será:

$$F = - K x \quad (\text{III} - 16)$$

Da segunda Lei de movimento de NEWTON:

$$F = ma = K x \quad (\text{III} - 17)$$

sendo:

$m$  = massa

$a$  = aceleração

$$a = - \frac{K}{m} x$$

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} = - \frac{K}{m} x \quad (\text{III} - 18)$$

O deslocamento  $x$  pode ser visualizado mais facilmente na FIGURA III - 9, onde:

$$x = A \cos \theta \quad (\text{III} - 19)$$

$$\theta = \omega t \quad \text{ângulo de fase}$$

O movimento de P é o mesmo que o movimento do corpo sob a influência de uma força restauradora, sem atrito:

$$x = A \cos \omega t \quad (\text{III} - 20)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\omega A \sin \omega t \quad (\text{III} - 21)$$

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -\omega^2 A \cos \omega t \quad (\text{III} - 22)$$

Das equações (III - 18) e (III - 20)

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = a = - \frac{K}{m} x = -\omega^2 x \quad (\text{III} - 23)$$

$$\omega^2 = \frac{K}{m} \quad \text{ou} \quad \omega = \sqrt{\frac{K}{m}} = 2 \pi f \quad (\text{III} - 24)$$

Portanto:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (\text{III} - 25)$$

Esta equação permite verificar a frequência de vibração de um corpo com determinada massa, quando oscila sob a influência de uma força elástica restauradora. Como o período é o inverso da frequência.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} \quad (\text{III}-26)$$

Considerando-se os desenvolvimentos já feitos, admitindo-se a presença de um amortecedor no sistema e com base nas condições de equilíbrio de um corpo elástico, a equação diferencial de equilíbrio será num instante  $t$ :

$$F(t) = m \ddot{x} + c \dot{x} + Kx \quad (\text{III}-27), \text{ onde:}$$

$x$  = deslocamento

$\dot{x}$  = velocidade, ou derivada primeira em relação ao tempo

$\ddot{x}$  = aceleração da massa, ou derivada segunda

$K$  = constante da mola

$c$  = coeficiente de amortecimento

$F(t)$  = função força, variável com o tempo

Trabalhos de MORRIS<sup>17,18</sup> desenvolvidos na NASA mostraram que as frequências predominantes de resposta calculadas pela equação (III-25) foram:

Para jato de treinamento T-33	-----	2	a 3	cps
Para aeronave convencional de transporte	----	1	a 1,5	cps
Para aeronave turbo-jato de transporte	----	0,75		cps

Com base nessa verificação aparente, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> obtiveram uma relação logarítmica supostamente linear, estendendo a curva para oito (08) aeronaves diferentes, incluindo uma com até 1.350.000 libras. Os dados não foram suficientes para testes de regressão.

A expressão encontrada foi:

$$\log m - 2,0 \log f + 3,35 \quad (\text{III} - 28), \text{ onde:}$$

$m$  = massa da aeronave em  $lb \times s^2 \times ft^{-1}$

$f$  = ciclo por segundo.

Figura III-8. Sistema de movimento harmônico simples.

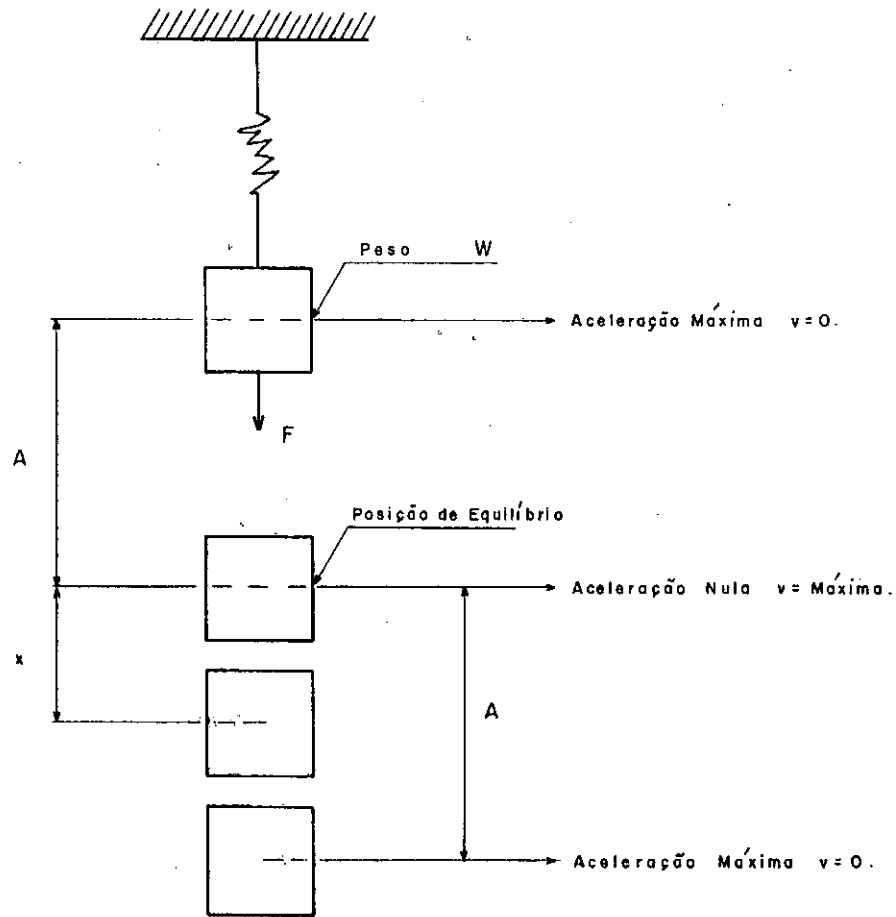
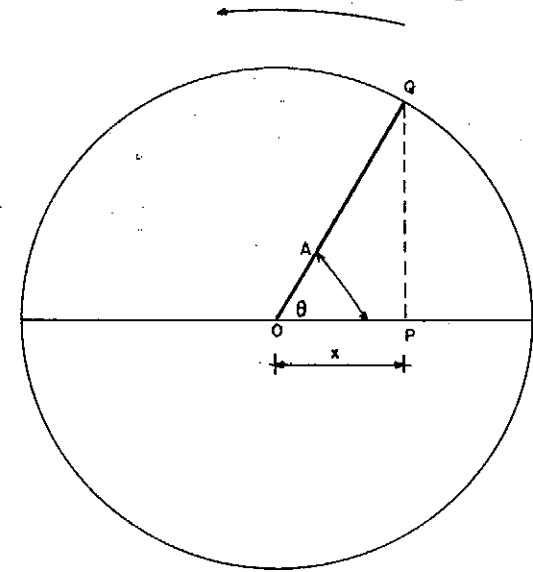


Figura III-9. Movimento harmônico com projeção de um ponto que se move numa circunferência.



$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$$



Segundo YANG<sup>35</sup> para o ESTADO CONSTANTE DE VIBRAÇÃO as características do sistema de resposta estariam estreitamente relacionadas à frequência fundamental  $f$  (que inclui a constante da mola e a massa do sistema) e às características de amortecimento  $c$ , como mostra a FIGURA III - 10.

Se as frequências relativas à função força e à função resposta estão muito próximas, a função força assume as características mostradas na FIGURA III - 11a e o sistema de resposta (função resposta) as características da FIGURA III-11b. Como interação resultante desses dois sistemas, obtém-se as características mostradas na FIGURA III - 11c.

Num intervalo definido, surgirá o valor de pico  $FH$ , sendo  $H$  o FATOR DE AMPLIAÇÃO da vibração forçada, que é comumente conhecida como RESSONÂNCIA (do estado constante de vibração). O fator de ampliação  $H$  pode ser expresso através da Equação III-29.

$$H^2 = \frac{1}{[1 - (w/f)^2]^2 + (2c \times w/f)^2} \quad (\text{III} - 29), \text{ onde:}$$

$H$  = fator de ampliação da vibração forçada

$w$  = frequência da função força (c/s)

$c$  = características de amortecimento

$f$  = frequência fundamental do sistema de resposta (c/s)

Afirma YANG<sup>36</sup> que para grandes faixas de operações com aeronaves, a frequência natural varia de 1 a 2 c/s. A frequência natural do pavimento e do subleito está entre 7 e 50 c/s. e a frequência natural do arcabouço estrutural da aeronave, na faixa 6 a 10 c/s. Desta forma, a máxima resposta para um estado constante de vibração, estaria aquém de 0,03 g ( $g$  = aceleração da gravidade), ou seja, abaixo de 3 % do peso estático para um fator de ampliação nos limites de 1,003 a 1,03.

### III-3 RELAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Conforme descrevem LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, quando aeronaves estão em movimento, algumas irregularidades da superfície do pavimento poderão causar respostas de frequências de ressonância,

e as passagens repetidas, de certa forma, contribuirão para a formação de irregularidades de conformações aproximadamente senoidais. Durante sucessivas decolagens, as irregularidades tendem a se acentuar. Obviamente, aeronaves mais pesadas transferirão mais energia e haverá um maior efeito sobre os modelos de irregularidades.

Trabalhos desenvolvidos por TUNG<sup>31</sup> mostraram que a força na perna principal do trem de pouso de aeronaves BOEING - 707 e 733 - 94, atingiu até 1,65 vezes a carga estática em velocidades constantes de 100 pés/s (60 nós).

Considerando-se que a estrutura do pavimento e o subleito são de natureza elástica ou quase elástica, depois de algumas repetições de carga, os recalques serão inevitáveis.

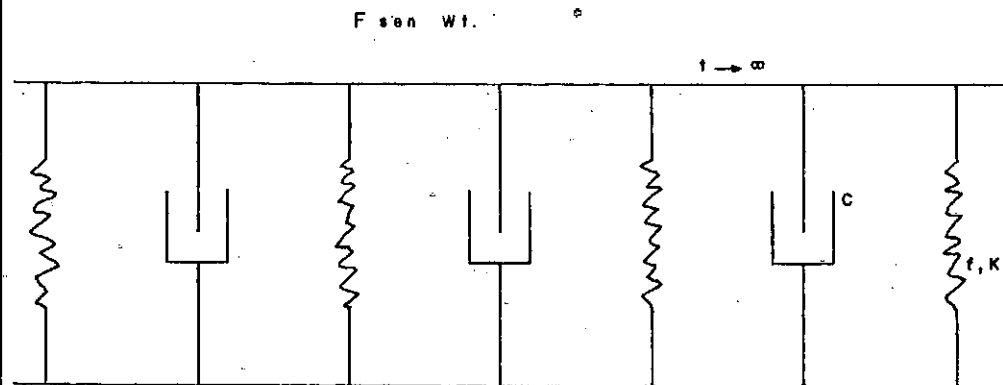
Admitem também, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> que a análise de relações de energia ainda é incompleta, mas tudo indica que seja importante a transferência de energia cinética, pois parte dela, depois do impacto, é transformada em deformação não elástica, calor, ruído, recuperação elástica (*rebound*), etc.

Dessa forma, a transferência de energia resultaria em deformações permanentes da infra-estrutura. Como a sustentação da aeronave aumenta com a velocidade, há redução da massa efetiva sobre o pavimento. Entretanto, se se considerar que a energia cinética é função da velocidade ao quadrado ( $E_c = 1/2 m v^2$ ), o decréscimo da massa efetiva será compensado pelo acréscimo da velocidade.

Os mesmos autores (LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>) citam exemplo para um BOEING 707 - 300C onde, do início da rolagem até a região de grande sustentação (próximo à decolagem), há uma perda de 18 % na massa efetiva, e acréscimo de 55 % na energia cinética. Com tais considerações, eles afirmam que, qualitativamente, pode ser previsto que as maiores irregularidades na superfície da pista ocorrerão próximo aos pontos de maior velocidade, ou de maiores sustentações (admitindo-se vários tipos de aeronaves).

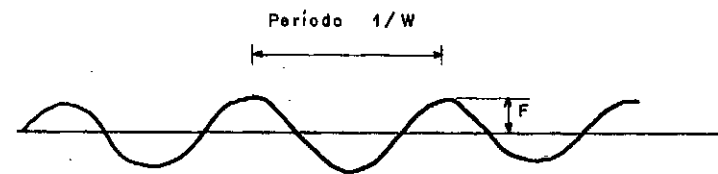
É necessário que se tenha em mente que esses problemas não são tão simples, pois há que se considerar os efeitos não só da decolagem, mas dos sucessivos pousos, além dos vários tipos de aeronaves que operam numa pista, cada uma com características próprias de geometria de trem de pouso, solicitações, frequências fundamentais, etc.

Figura III-10 . Características do sistema de vibração.

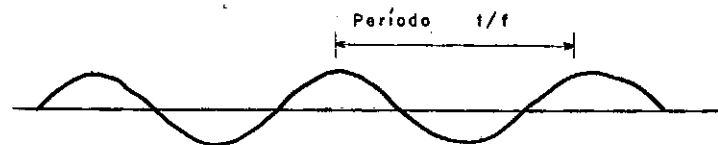


$$F(t) = m \ddot{x} + c \dot{x} + Kx$$

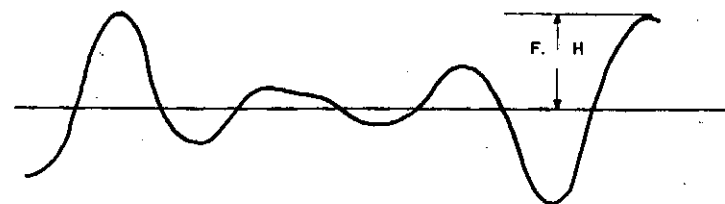
Figura III-11 - Estado constante de vibração forçada.



a) Características de funções força.



b) Características de funções resposta.



c) Resposta dinâmica da vibração forçada.

## CAPÍTULO IV

MATERIAIS E MÉTODOS

Os estudos foram desenvolvidos nas pistas de pouso das Bases Aéreas de SANTA CRUZ — pista 04 / 22, no Estado do Rio de Janeiro, e de CANOAS — pista 12 / 30, no Estado do Rio Grande do Sul, assim caracterizadas quanto à sua geometria e tipo de revestimento:

PISTA 04 / 22 - BASE AÉREA DE SANTA CRUZ (RJ) — (BASC - RJ)

Comprimento ----- 2 743,70 m

Largura ----- 45,00 m

TRECHO	S I T U A Ç Ã O
Da estaca - 40 + 3,70 à estaca 00	CABECEIRA 22 - 803,70 m em concreto de cimento PORTLAND com placas de 7,00 x 3,50 m (TRECHO NÃO ESTUDADO INICIALMENTE COM NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO)
Da estaca 00 à estaca 86 + 15	1 735 m em concreto asfáltico, entre as cabeceiras 04 e 22
Da estaca 86 + 15 à estaca 97	CABECEIRA 04 - 205 m em concreto de cimento PORTLAND, com placas de 7,00 x 3,50 m

PISTA 12 / 30 - BASE AÉREA DE CANOAS(RS) — (BACO - RS)

Comprimento ----- 2 750 m

Largura ----- 45 m

TRECHO	S I T U A Ç Ã O
Da estaca 00 à estaca 15	CABECEIRA 12 - 300 m em concreto de cimento PORTLAND, com placas de 7,00 m x 3,25 m
Da estaca 15 à estaca 37 + 10	450 m em concreto asfáltico
Da estaca 37 + 10 à estaca 45	CABECEIRA ANTIGA - 150 m em concreto de cimento PORTLAND, com placas de 7,00 x 3,25 m
Da estaca 45 à estaca 122 + 12	1 552 m em concreto asfáltico
Da estaca 122 + 12 à estaca 137 + 10	CABECEIRA 30 - 298 m em concreto de cimento PORTLAND, com placas de 7,00 m x 3,25 m

- \* -

A escolha dessas pistas deveu-se ao fato de que os pilotos de aeronaves tipo caça F - 5B e F - 5E estavam fazendo sérias reclamações quanto à qualidade de superfície de rolamento da pista 04 / 22 da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), o que parecia não se verificar na pista 12 / 30 da Base Aérea de Canoas (RS).

Como forma de avaliação das irregularidades de superfície, optou-se, inicialmente, em empregar o rugosímetro tipo BPR (*Bureau of Public Roads*), da COPPE - UFRJ (Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia - Universidade Federal do Rio de Janeiro), previamente calibrado.

A descrição desse equipamento e técnicas de calibração podem ser apreciadas nas referências BARBOSA & AREIAS NETTO<sup>1</sup> e HAAS & HUDSON<sup>8</sup>.

Uma outra forma de avaliação das irregularidades adotada foi o emprego do nivelamento topográfico. Para tanto, empregou-se um teodolito para alinhamentos marca FENNEL FT 1 A, níveis marca FENNEL automáticos - modelos FNA K1 e AUBAN, trenas de 20 m marca ESLON de *fiber-glass*, balizas de ferro desmontáveis de 2 m e miras dobráveis marca NEDO de 4 m.

Outros materiais empregados foram apenas como auxílio às marcações e medidas executadas no campo, tais como tinta, lápis, cera, pincel, cadernetas de campo, além de equipamentos e materiais de escritório usados para desenho de plantas e perfis topográficos.

A pesquisa foi iniciada com a passagem do rugosímetro em três repetições, em cinco linhas previamente fixadas: NO EIXO, a 8,40 m e a 4,20 m dos LADOS ESQUERDO e DIREITO DO EIXO de ambas as pistas. Por facilidade de operação, as leituras no contador de forma digital, instalado no painel do veículo que rebocava o rugosímetro (os trabalhos foram conduzidos sem o emprego do oscilógrafo), foram processadas todas as vezes em que se passava em frente às LUMINÁRIAS do balizamento dos bordos de pista. Conhecendo-se a distância entre elas, procedeu-se ao cálculo dos índices de rugosidade em mm/km para trechos de, aproximadamente, 60 m de pista e em alguns casos, próximo de 35 m (espaçamento mais apertado de LUMINÁRIAS).

Para facilitar as observações, os resultados encontrados foram colocados em gráficos tipo coluna, tendo-se no eixo das abcissas os diversos trechos de pista, e nas ordenadas os valores dos Índices de Rugosidade, expressos em mm/km, para cada linha pesquisada.

O MANUAL DE PROJETOS DE AERÓDROMOS da Organização Internacional de Aviação Civil<sup>14</sup> apresenta uma relação entre o estado de superfície dos pavimentos e o índice de rugosidade, em

polegadas por milha, obtido com o perfilômetro de rodas múltiplas, desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas de Transporte e Rodoviárias (TRRL) da Grã-Bretanha. Através de equação de correlação entre o perfilômetro de rodas múltiplas e o rugosímetro tipo BPR (HAAS & HUDSON<sup>8</sup>) estimaram-se os valores da classificação apresentada no QUADRO IV.1 e fizeram-se comparações com os diversos índices de rugosidade obtidos para cada linha estudada em ambas as pistas.

Equação de correlação empregada:

$$\log R = 0,4496 \times \log q + 1,2581 \quad (\text{IV.1})$$

onde:

$R$  = índice de rugosidade em polegadas / milha para o rugosímetro tipo BPR

$q$  = índice de rugosidade em polegadas / milha para o perfilômetro de rodas múltiplas

#### QUADRO IV.1

CLASSIFICAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DE UMA PISTA,  
EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE RUGOSIDADE  
OBTIDO COM RUGOSÍMETRO TIPO BPR

CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE	ÍNDICE DE RUGOSIDADE (IR) (mm / km)
Muito boa	< 1 499
Boa	1 499 a 2 162
Regular	2 162 a 2 793
Ruim	2 793 a 3 393
Muito ruim	> 3 393

Foram feitos estudos estatísticos com os resultados obtidos e através dos valores de  $F$  encontrados nas análises de variância, procuraram-se as diferenças estatisticamente significativas entre os índices de rugosidade das linhas estudadas em cada pista e procedeu-se à posterior verificação dos contrastes de médias com o teste de TUKEY (BRITTO<sup>3,4</sup>, GRANNER<sup>6</sup>, SPIEGEL<sup>28</sup>, WONNACOTT & WONNACOTT<sup>35</sup>).

Os dados obtidos com o nivelamento topográfico geométrico foram colocados em planta, nas escalas horizontal 1 cm = 1 m (1:100) e vertical 1 mm = 1 m (1:1). Obtiveram-se, assim, três (03) perfis para a pista de pouso de Santa Cruz (RJ) e dois (02) para a pista de pouso de Canoas (RS).

Para facilitar os trabalhos subseqüentes, foram tiradas cópias heliográficas das pranchas em papel vegetal com os perfis desenhados, sendo as mesmas recortadas em faixas de 10 cm de largura, o que era suficiente para se ter a linha de superfície da pista de pouso, obtida no nivelamento, sendo posteriormente emendadas e enroladas. Assim, facilmente, podia-se analisar cada perfil de per si, bastando para tanto, fazer a faixa de 10 cm de largura correr sobre uma prancheta.

Com os perfis prontos para serem analisados, inicialmente pesquisou-se a forma de distribuição das irregularidades, medindo-se cada BACIA ou depressão quanto a comprimento da CORDA e flexa máxima (dupla amplitude), computando-se separadamente esses valores, no que diz respeito a se concavidade apresentava-se PARA CIMA ou PARA BAIXO, a cada cinco (05) estacas (100 m de pista). Para efeito comparativo entre as características das duas pistas, transformaram-se os dados em números de BACIAS / 100 m de pista, distribuídas em classes de 2 m, independentemente do sentido da concavidade, nos mesmos trechos.

É importante citar que por se entender que os pilotos estavam reclamando apenas a partir do trecho de concreto asfáltico (estaca 00), não se fez levantamento topográfico geométrico nos primeiros 803,70 m, a partir da cabeceira 22 da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz, correspondentes a um prolongamento da pista em concreto de cimento PORTLAND (estaqueamento negativo, estaca 00 até à - 40 + 3,70).

Foram empregados dois métodos para análise dos perfis. Um deles baseado em estudos conduzidos por HOUBOLT<sup>12</sup>, com a aná-



lise dos *power spectra* de duas pistas. A partir de suas conclusões, desenvolveu-se um GABARITO de 1,20 m de comprimento por 3,0 cm de altura, conforme será visto no CAPÍTULO VI. A análise por esse critério consistiu, apenas, em se identificar os trechos das pistas, representados pelos perfis topográficos que não se enquadravam nesse GABARITO, considerando-os críticos.

O outro método consistiu na análise direta dos dados obtidos no nivelamento topográfico geométrico das pistas, através de procedimentos estatísticos (SONNENBURG<sup>27</sup>). Sua origem e descrição poderão ser apreciados também no CAPÍTULO VI. Entretanto, cabem aqui algumas considerações sobre seu emprego nas duas pistas.

Para o caso da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (BASC - RJ), não houve grandes problemas, pois a mesma apresenta greide horizontal, à exceção de uma concordância vertical feita entre as estacas 83 e 86 + 15 e um trecho inclinado da estaca 95 à 97. No caso da concordância vertical, não se tratava de uma curva bem definida e foi necessário ajustarem-se duas retas de mínimos quadrados, uma da estaca 83 à 84, e outra da estaca 84 à 86 + 15, o mesmo ocorrendo para o trecho da estaca 95 à 97. Essas retas, para as respectivas linhas estudadas, encontram-se no QUADRO IV.2 (BASC - RJ).

#### QUADRO IV.2

(BASC - RJ) - RETAS DE MÍNIMOS QUADRADOS AJUSTADAS PARA TRES TRECHOS  
DA PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - (RJ)

LINHAS ESTUDADAS	ESTACAS	TIPO DE REVESTIMENTO	RETAS AJUSTADAS
4,20 m à esquerda do eixo	83 a 84	Concreto Asfáltico	$Y = 2140 + 0,001905X$
	84 a 86 + 15	Concreto Asfáltico	$Y = 2177 + 0,003472X$
	95 a 97	Concreto Cimento	$Y = 2392 + 0,565500X$
Eixo	83 a 84	Concreto Asfáltico	$Y = 2215 + 0,007143X$
	84 a 86 + 15	Concreto Asfáltico	$Y = 2231 + 0,003564X$
	95 a 97	Concreto Cimento	$Y = 2453 + 0,433600X$
4,20 m à direita do eixo	83 a 84	Concreto Asfáltico	$Y = 2141 + 0,002850X$
	84 a 86 + 15	Concreto Asfáltico	$Y = 2188 + 0,004056X$
	95 a 97	Concreto Cimento	$Y = 2394 + 0,213000X$

Já a pista de pouso da Base Aérea de Canoas (BACO - RS) apresenta greide variável, como pode ser visto na FIGURA IV.1 (BACO - RS). Nesse caso, as análises foram conduzidas para faixas distintas da pista, ajustando-se várias retas de mínimos quadrados como consta no QUADRO IV.3 (BACO - RS).

QUADRO IV.3

RETAS DE MÍNIMOS QUADRADOS  
AJUSTADAS PARA TRÊS LONGOS TRECHOS  
DA PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE CANOAS — (RS)

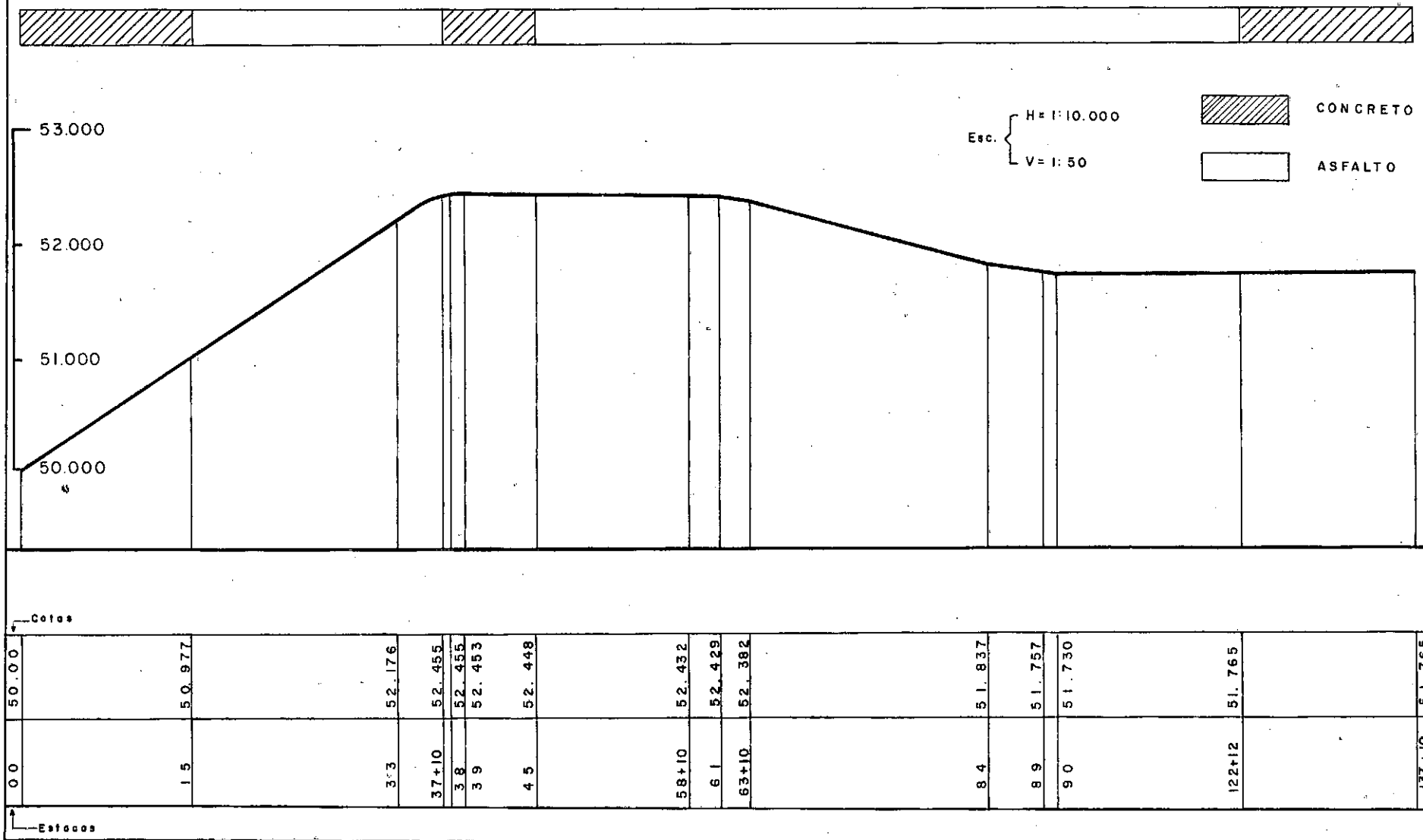
LINHAS ESTUDADAS	ESTACAS	TIPOS DE REVESTIMENTO	RETAS AJUSTADAS
4,20 m à esquerda do eixo	00 a 15	Concreto Cimento	$Y = 49976 + 3,3220440X$
	15 a 33	Concreto Asfáltico	$Y = 50962 + 3,2893692X$
	63+10 a 84	Concreto Asfáltico	$Y = 52357 - 1,3006190X$
Eixo	00 a 15	Concreto Cimento	$Y = 50002 + 3,2904455X$
	15 a 33	Concreto Asfáltico	$Y = 50989 + 3,2787472X$
	63+10 a 84	Concreto Asfáltico	$Y = 52380 - 1,3013520X$

OBS.: Os trechos compreendidos entre as estacas 33 à 39, 58+10 à 63+10 e 84 à 89 foram analisados apenas com o emprego do GABARITO, pois não se conseguiu um ajuste adequado para as curvas de concordância vertical.

Figura IV 1- (BACO-RS)

# PERFIL LONGITUDINAL DA PISTA DE POUSO

BASE AEREA DE CANOAS - RS.



## CAPÍTULO V

## ESTUDOS DE RUGOSIDADE FEITOS COM O RUGOSÍMETRO TIPO BPR

*(BUREAU OF PUBLIC ROADS) DA COPPE - UFRJ*

Os trabalhos de campo foram conduzidos no dia 30 de novembro de 1980, e 02 de março de 1981, respectivamente, para as pistas de pouso das Bases Aéreas de CANOAS (RS) e SANTA CRUZ (RJ), de acordo com os procedimentos descritos no CAPÍTULO IV (MATERIAIS E MÉTODOS).

O rugosímetro foi deslocado à velocidade de 20 mph (32 km/h), (BARBOSA & AREIAS NETTO<sup>1</sup>, HAAS & HUDSON<sup>8</sup>), obtendo-se três leituras no contador digital para cada trecho, dentro de cada linha previamente determinada, cujas médias, já transformadas em mm/km, são apresentadas nas TABELAS V-1 (BASC RJ) e V-4 (BACO RS) e representadas através dos GRÁFICOS V-1 a V-10.

Apresenta-se, ainda, nas TABELAS V-2 (BASC - RJ) e V-5 (BACO - RS), o resumo das análises estatísticas feitas com os índices de rugosidade para cada trecho de concreto cimento e concreto asfáltico. Foram resumidos, também, nas TABELAS V-3.A e V-3.B (BASC - RJ) e V-6.A e V-6.B (BACO - RS), os resultados obtidos nas análises de variância, feitas para trechos de concreto cimento e concreto asfáltico, separadamente, o que permitiu a verificação das diferenças estatísticas entre os índices de rugosidade encontrados nas cinco (05) linhas estudadas. Para tanto, empregou-se o teste de TUKEY (BRITTO<sup>3,4</sup> e GRANER<sup>6</sup>) para o estudo dos contrastes entre as médias. As linhas estudadas foram designadas pelas letras **A**, **B**, **C**, **D** e **E**, como segue abaixo, para facilitar a forma de apresentação dos contrastes:

- A → linha estudada a 8,40m do lado direito do eixo da pista
- B → linha estudada a 4,20m do lado direito do eixo da pista
- C → linha estudada no eixo da pista
- D → linha estudada a 4,20m do lado esquerdo do eixo da pista
- E → linha estudada a 8,40m do lado esquerdo do eixo da pista

TABELA V.1 - (BASC-RJ)

ÍNDICES DE RUGOSIDADE MÉDIOS EM mm/km  
OBTIDOS COM O RUGOSÍMETRO TIPO BPR

DISTÂNCIAS (m)	ÍNDICE DE RUGOSIDADE EM mm/km				
	LADO DIREITO		EIXO	LADO ESQUERDO	
	a 8,40m do eixo	a 4,20m do eixo		a 4,20m do eixo	a 8,40m do eixo
Est -40+3,70					
39	1769	1303	2225	2388	1921
43	1608	1772	1703	1464	1805
53	1864	1810	1733	1970	1225
53	1704	1570	1733	1518	1465
53	1651	1837	1518	1890	1837
53	1890	1864	1518	1544	1305
53	1598	1677	1334	1837	1305
53	1864	1757	1414	1704	1518
53	1784	1305	1462	1944	1544
53	1784	1571	1334	1890	1518
53	2024	1598	1382	1890	1571
53	1997	2130	1494	1997	1598
53	1917	2316	1438	2449	1278
53	2050	1731	1542	1944	1944
53	1411	1624	1358	1864	2077
39	2026	1845	1813	1881	2135
Est 00					
29	1508	1849	1941	2384	1703
51	1104	1300	1386	1688	1051
51	1245	1411	1685	1826	1245
51	1300	1494	1660	1577	1411
52	1465	1927	1465	1818	1330
29	1654	1703	1898	1849	1606
29	1557	1168	2044	1504	1124
59	1363	1457	1414	1602	1100
59	1148	1602	1629	1722	1387
59	1313	1435	1363	1579	1292
59	1292	1866	1629	1913	1483
59	1268	1650	1485	1602	1579
59	1268	1507	1414	1507	1196
59	1148	1457	1406	1530	1172
59	1244	1674	1270	1626	1244
59	1315	1602	1485	1172	1076
59	1602	1866	1457	1674	1220
59	1387	1531	1507	1555	1172
59	1507	1459	1342	2033	1172
59	1385	1626	1327	1866	1270
29	1411	2482	1504	1411	1703
29	1265	2676	1460	1606	1265
58	1336	2482	1533	1411	1119
58	1435	2044	1511	1557	1265
58	1314	1800	1555	1630	1119

DISTÂNCIAS	ÍNDICE DE RUGOSIDADE EM mm/km				
	LADO DIREITO		EIXO	LADO ESQUERDO	
	a 8,40m do eixo	a 4,20m do eixo		a 4,20m do eixo	a 8,40m do eixo
58	1387	1873	1584	1679	1241
58	1095	1435	1701	1800	1581
58	1095	1411	1482	2117	1387
58	1117	1628	1555	1971	1435
58	1290	1898	1825	1922	1484
58	1387	1922	2649	1800	1435
58	1387	1290	1803	1606	1363
Est 86+15					
58	1290	1022	1314	0973	1240
58	1265	1192	1511	1192	1411
58	1314	1630	1263	1131	1290
30	1453	1458	1369	2117	1693
31	1184	1548	1461	1024	1411
Est 97					

TABELA V.2 - (BASC-RJ) - RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS FEITAS  
COM OS ÍNDICES DE RUGOSIDADE OBTIDOS EM CADA TRECHO  
DE CONCRETO CIMENTO E CONCRETO ASFÁLTICO

TRECHOS EM ESTACAS	POSIÇÃO NA PISTA	mm/km					COEFICI- ENTE DE VARIAÇÃO %
		MÉDIA	MODA	MEDIANA	AMPLITUDE	DESVIO PADRÃO	
-40 a 00 CONCRETO CIMENTO	a 8,40m do lado direito	1809	1864 1784	1824	639	181	10,02
	a 4,20m do lado direito	1732	-	1750	1013	258	14,91
	EIXO	1563	1518 1733	1506	891	233	14,92
	a 4,20m do lado esquerdo	1886	-	-	985	266	14,11
	a 8,40m do lado esquerdo	1647	-	-	910	297	18,05
00 a:86+15 CONCRETO ASFÁLTICO	a 8,40m do lado direito	1331	1387	1315	559	145	10,89
	a 4,20m do lado direito	1704	1602 1866	1614	1508	350	20,51
	EIXO	1593	1485 1555	1509	1379	267	16,75
	a 4,20m do lado esquerdo	1704	-	-	1212	234	13,70
	a 8,40m do lado esquerdo	1320	-	-	652	182	13,79
86+15 a 97 CONCRETO CIMENTO	a 8,40m do lado direito	1301	-	1290	269	-	-
	a 4,20m do lado direito	1370	-	1458	608	-	-
	EIXO	1384	-	1369	248	-	-
	a 4,20m do lado esquerdo	1287	-	1131	1144	-	-
	a 8,40m do lado esquerdo	1409	1411	1411	453	-	-

TABELA V-3 — (BASC - RJ)

## RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA FEITAS

COM OS ÍNDICES DE RUGOSIDADE OBTIDOS EM CADA LINHA ESTUDADA

3.A - Análise de variância para os trechos de concreto cimento

FONTE DE VARIÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	DESVIO	VALORES DE F
Total	104	9 730 620		-	-
Linhas estudadas	4	582 771	145 693	382	1,59
Resíduo	100	9 147 849	91 478	302	-

3.B - Análise de variância para o trecho de concreto asfáltico

FONTE DE VARIÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	DESVIO	VALORES DE F
Total	159	15 527 634	-	-	-
Linhas estudadas	4	5 520 531	1 380 133	1 175	21,4**
Resíduo	155	10 007 103	64 562	254	-

(\*\*) Significativo ao nível de 1 %



# TESTE DE TUKEY PARA O ESTUDO DO CONTRASTE ENTRE AS MÉDIAS

(BRITTO<sup>3,4</sup>, GRANER<sup>6</sup>)

$$\Delta = q \times \frac{S}{\sqrt{r}} \quad \text{onde:}$$

$q$  → valores tabelados

$S$  → desvio do resíduo

$r$  → número de repetições

ao nível de 5 % →  $q = 3,86$  →  $\Delta = 206$

ao nível de 1 % →  $q = 4,60$  →  $\Delta = 246$

Como o valor de  $F$  foi altamente significativo ( $F = 21,4^{**}$ ) para o concreto asfáltico, apresentam-se abaixo os contrastes entre as médias:

$$A - B = 1331 - 1704 = 373^{**}$$

$$A - C = 1331 - 1593 = 262^{**}$$

$$A - D = 1331 - 1704 = 373^{**}$$

$$A - E = 1321 - 1320 = 11$$

$$B - C = 1704 - 1593 = 111$$

$$B - D = 1704 - 1704 = 0$$

$$B - E = 1704 - 1320 = 384^{**}$$

$$C - D = 1593 - 1704 = 111$$

$$C - E = 1593 - 1320 = 273^{**}$$

$$D - E = 1704 - 1320 = 384^{**}$$

(\*\*) Significativo ao nível de 1 %

TABELA V.4 - (BACO-RS) - ÍNDICES DE RUGOSIDADE MÉDIOS EM mm/km

OBTIDOS COM O RUGOSÍMETRO TIPO BPR

DISTÂNCIAS (m) ESTACA 00	ÍNDICE DE RUGOSIDADE EM mm/km					TIPO DE PAVIMENTO
	LADO DIREITO		EIXO	LADO ESQUERDO		
	a 8,40m do eixo	a 4,20m do eixo		a 4,20m do eixo	a 8,40m do eixo	
45,0	1975	1975	2714	2446	2728	CABECEIRA 12 RÍGIDO (CONCRETO CIMENTO)
60,0	2117	2046	3044	2540	2258	
58,1	2186	2696	2623	2623	2186	
60,1	2324	2465	2737	2042	2113	
60,2	2110	2250	2356	2180	2039	
60,1	1550	1831	1631	1550	1409	FLEXÍVEL (CONCRETO ASFÁLTICO)
60,1	1198	1901	1691	1479	1479	
60,2	1336	1969	1758	1547	1406	
60,0	1622	1905	1919	1905	1764	
60,2	1336	1336	1958	1828	1617	
60,0	1481	1481	1834	1905	1481	
58,1	1530	1748	1880	1894	1822	
38,2	2327	1994	2975	2216	1773	RÍGIDO (CONCRETO CIMENTO)
39,9	1910	2334	2986	1910	1591	
56,8	1714	1789	2497	2236	1863	
57,1	1557	2002	2372	2076	1779	
57,2	1480	1850	1813	1850	1554	FLEXÍVEL (CONCRETO ASFÁLTICO)
57,0	1559	1783	1623	1783	1411	
55,0	1462	1847	1655	1616	1616	
57,0	1188	1856	1645	1559	1634	
57,2	1406	1628	1691	1628	1480	
56,5	1423	2173	1585	1873	1648	
56,6	1346	1571	1544	1571	1496	
40,0	1481	2117	1815	1693	1693	
38,0	1671	2117	2156	1448	1671	
57,9	1316	1828	1547	1535	1462	
57,6	1396	2058	1705	1470	1837	
58,1	1530	1967	1701	1530	1603	
57,8	1465	1831	1637	1538	1611	
57,4	1622	1844	1682	1475	1549	
58,1	1530	1894	1603	1676	1530	
57,8	1391	1757	1670	1757	1684	
57,1	1483	1631	1668	1631	1779	
57,4	1327	2065	1574	1622	1696	
57,9	1535	1754	1623	1609	1682	
57,0	1559	1931	1820	1856	1634	
57,7	1394	2128	1687	1541	1760	
57,7	1467	1834	1724	1614	1834	
57,0	1411	2228	1797	1856	1634	
59,0	1435	2009	1675	1435	1507	
57,9	1170	1901	1583	1828	1901	
38,5	1429	1869	1847	1649	2199	
40,0	1693	2117	1609	1799	1799	

DISTÂNCIAS (m)	ÍNDICE DE RUGOSIDADE EM mm/km					TIPO DE PAVIMENTO
	LADO DIREITO		EIXO	LADO ESQUERDO		
	a 8,40m do eixo	a 4,20m do eixo		a 4,20m do eixo	a 8,40m do eixo	
58,9	1868	2156	2491	2300	2012	RÍGIDO (CONCRETO CIMENTO)
59,8	2265	1982	2902	2053	2053	
59,0	2081	2081	2561	2081	2224	
60,5	2029	2099	2438	2029	2169	
38,5	2199	2309	3079	2089	2419	
37,6	2364	2252	2702	1914	2364	
ESTACA 137+10						CABECEIRA 30

TABELA V.5 - (BACO-RS)

RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS FEITAS COM OS ÍNDICES DE  
RUGOSIDADE OBTIDOS EM CADA TRECHO DE  
CONCRETO CIMENTO E CONCRETO ASFÁLTICO  
TABELA V.5.A

TRECHOS EM ESTACAS	POSICÃO NA PISTA	mm/km					COEFICI- ENTE DE VARIAÇÃO %
		MÉDIA	MODA	MEDIANA	AMPLITUDE	DESVIO PADRÃO	
00 a 15 (CONCRETO DE CIMENTO)	a 8,40m do lado direito	2142	-	2117	349	-*	-
	a 4,20m do lado direito	2286	-	2250	721	-*	-
	EIXO	2695	-	2714	688	-*	-
	a 4,20m do lado esquerdo	2366	-	2446	581	-*	-
	a 8,40m do lado esquerdo	2265	-	2186	689	-*	-
15 a 37+10 CONCRETO ASFÁLTICO	a 8,40m do lado direito	1436	1336	1481	424	-*	-
	a 4,20m do lado direito	1739	-	1831	633	-*	-
	EIXO	1810	-	1834	327	-*	-
	a 4,20m do lado esquerdo	1730	1905	1828	426	-*	-
	a 8,40m do lado esquerdo	1568	-	1481	416	-*	-
37+10 a 45 (CONCRETO DE CIMENTO)	a 8,40m do lado direito	1877	-	1812	770	-*	-
	a 4,20m do lado direito	2030	-	1998	545	-*	-
	EIXO	2708	-	2736	614	-*	-
	a 4,20m do lado esquerdo	2110	-	2146	326	-*	-

TRECHOS EM ESTACAS	POSIÇÃO NA PISTA	mm/km					COEFICI- ENTE DE VARIAÇÃO %
		MÉDIA	MODA	MEDIANA	AMPLITUDE	DESVIO PADRÃO	
37+10 a 45 CONCRETO DE CIMENTO	a 8,40m do lado esquerdo	1752	-	1776	272	-*	-
45 a 122+12 CONCRETO ASFÁLTICO	a 8,40m do lado direito	1451	1530 1559	1462	523	123	8,44
	a 4,20m do lado direito	1911	2117	1869	657	173	9,05
	EIXO	1692	1623	1670	612	126	7,45
	a 4,20m do lado esquerdo	1646	1856	1622	438	136	8,26
	a 8,40m do lado esquerdo	1663	1634	1634	788	163	9,80
122+12 a 137+10 CONCRETO CIMENTO	a 8,40m do lado direito	2134	-	2140	496	-*	-
	a 4,20m do lado direito	2146	-	2128	327	-*	-
	EIXO	2696	-	2632	641	-*	-
	a 4,20m do lado esquerdo	2078	-	2067	386	-*	-
	a 8,40m do lado esquerdo	2207	-	2197	407	-*	-

(\*) Os desvios padrões não foram calculados devido a pequena quantidade de dados. Entretanto, analisando-se conjuntamente os trechos de concreto de cimento tem-se:



TABELA V-6 — (BACO - RS)

RESULTADOS OBTIDOS NAS ANÁLISES DE VARIÂNCIA FEITAS  
COM OS ÍNDICES DE RUGOSIDADE OBTIDOS EM CADA LINHA ESTUDADA

6.A - Análise de variância para os trechos de concreto cimento

FONTE DE VARIÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	DESVIO	VALORES DE F
Total	74	8 194 578	-	-	-
Linhas estudadas	4	4 040 814	1 010 204	1005	17**
Resíduo	70	4 153 764	59 339	244	-

(\*\*) Significativo ao nível de 1 %

CONTRASTE ENTRE AS MÉDIAS, SEGUNDO O TESTE DE TUKEY:

(BRITTO<sup>3ª</sup>, GRANER<sup>6</sup>)

Ao nível de 5 %  $\rightarrow q = 3,98 \rightarrow \Delta = 251$

Ao nível de 1 %  $\rightarrow q = 4,82 \rightarrow \Delta = 304$

A - B = 2068 - 2162 = 94

A - C = 2068 - 2698 = 630\*\*

A - D = 2068 - 2182 = 114

A - E = 2068 - 2105 = 37

B - C = 2162 - 2698 = 536\*\*

B - D = 2162 - 2182 = 20

B - E = 2162 - 2105 = 57

C - D = 2698 - 2182 = 516\*\*

C - E = 2698 - 2105 = 593\*\*

D - E = 2182 - 2105 = 77

(\*\*) Significativo ao nível de 1 %

6.B - Análise de variância para os trechos de concreto asfáltico

FONTE DE VARIAÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	DESVIO	VALORES DE F
Total	169	7 315 474	-	-	-
Linhas estudadas	4	3 265 385	816 346	904	33,3**
Resíduo	165	4 050 089	24 546	157	-

(\*\*) Significativo ao nível de 1 %

CONTRASTE ENTRE AS MÉDIAS, SEGUNDO O TESTE DE TUKEY:

Ao nível de 5 %  $\rightarrow q = 3,86 \rightarrow \Delta = 104$ Ao nível de 1 %  $\rightarrow q = 4,60 \rightarrow \Delta = 124$ 

$$A - B = 1448 - 1875 = 427^{**}$$

$$A - C = 1448 - 1716 = 268^{**}$$

$$A - D = 1448 - 1663 = 215^{**}$$

$$A - E = 1448 - 1644 = 196^{**}$$

$$B - C = 1875 - 1716 = 159^{**}$$

$$B - D = 1875 - 1663 = 212^{**}$$

$$B - E = 1875 - 1644 = 231^{**}$$

$$C - D = 1716 - 1663 = 53$$

$$C - E = 1716 - 1644 = 72$$

$$D - E = 1663 - 1644 = 19$$

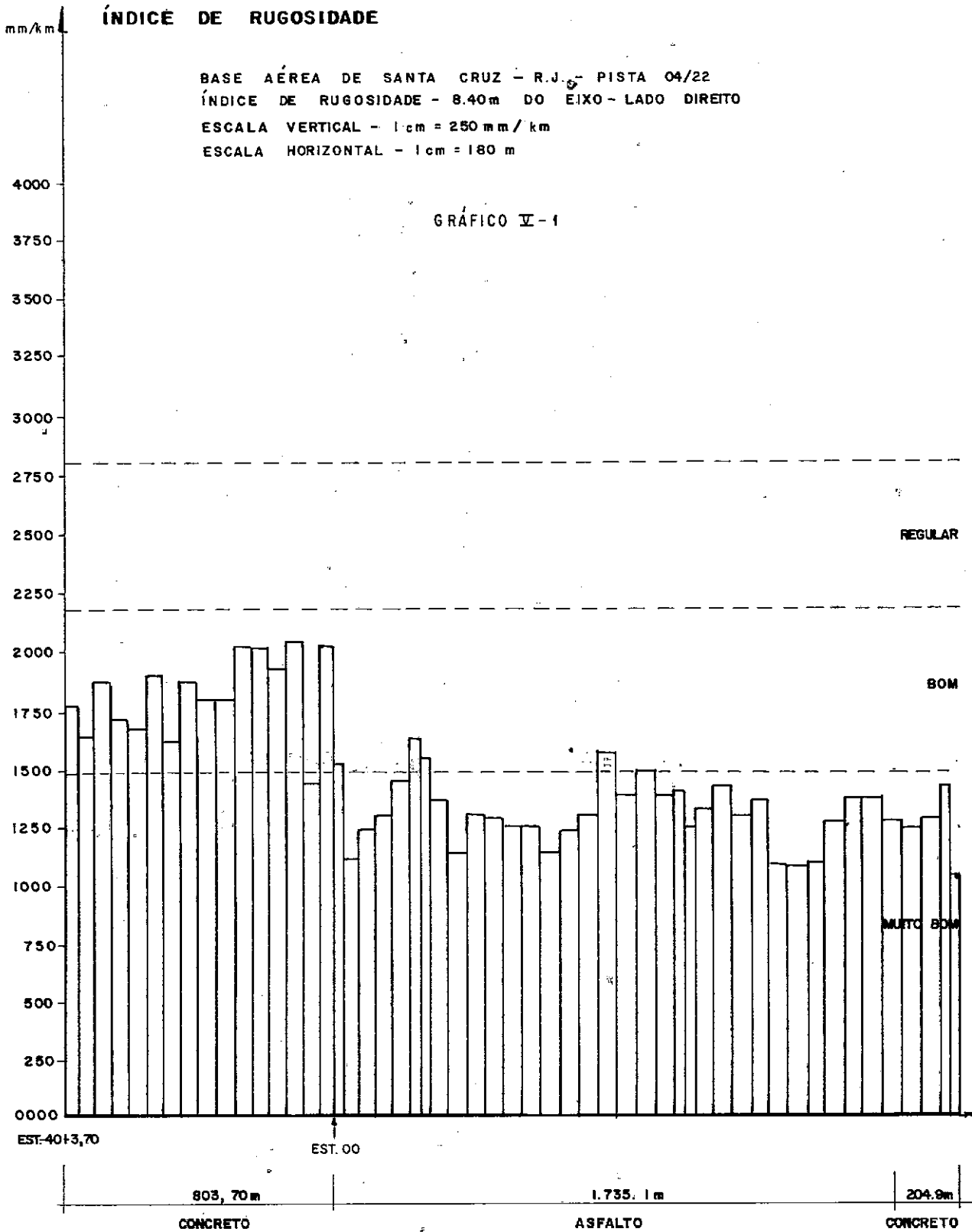
(\*\*) Significativo ao nível de 1 %



# ÍNDICE DE RUGOSIDADE

BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - R.J. - PISTA 04/22  
 ÍNDICE DE RUGOSIDADE - 8.40m DO EIXO - LADO DIREITO  
 ESCALA VERTICAL - 1cm = 250 mm / km  
 ESCALA HORIZONTAL - 1cm = 180 m

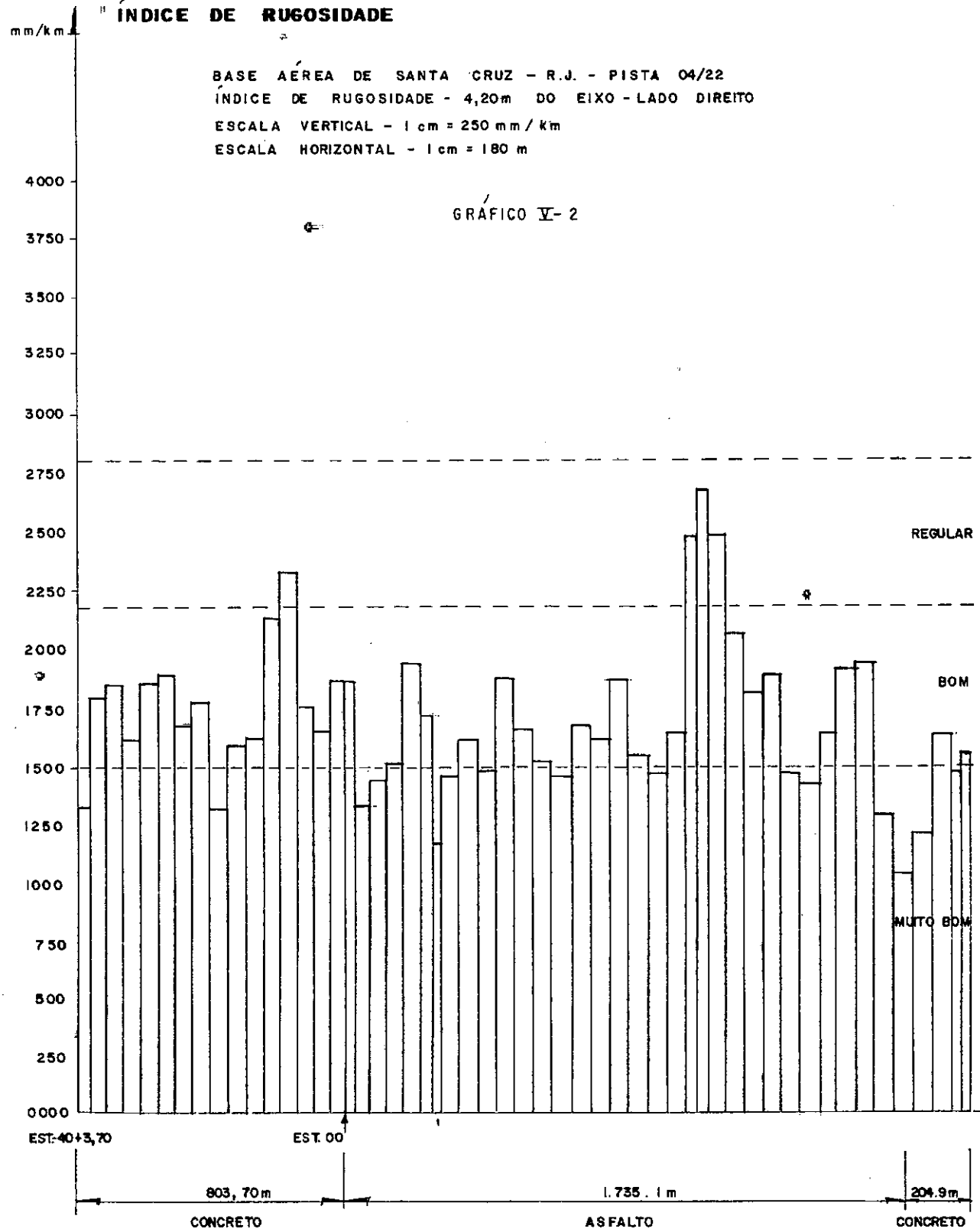
GRÁFICO V-1



# ÍNDICE DE RUGOSIDADE

BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - R.J. - PISTA 04/22  
 ÍNDICE DE RUGOSIDADE - 4,20m DO EIXO - LADO DIREITO  
 ESCALA VERTICAL - 1 cm = 250 mm / km  
 ESCALA HORIZONTAL - 1 cm = 180 m

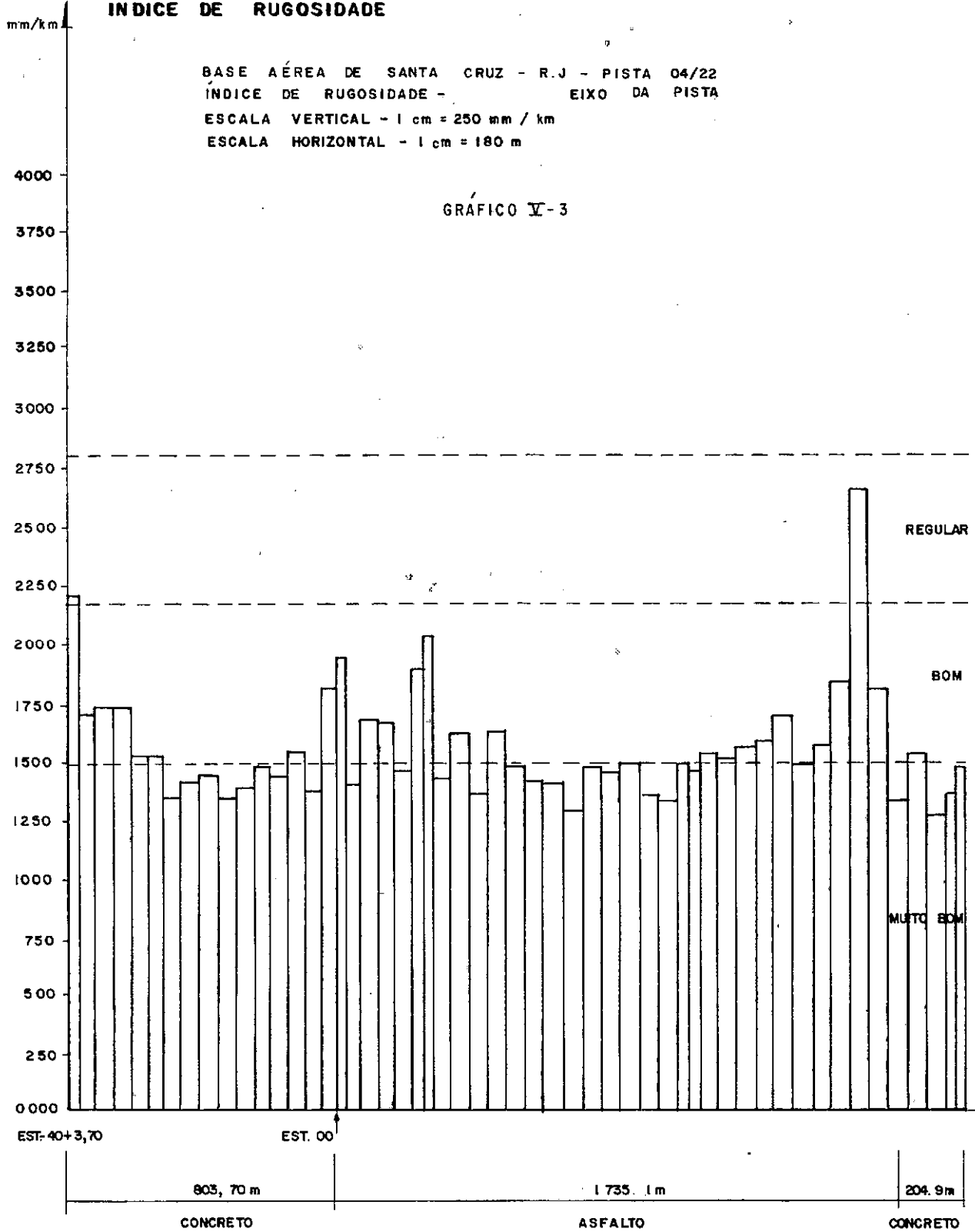
GRÁFICO V-2



# ÍNDICE DE RUGOSIDADE

BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - R.J - PISTA 04/22  
 ÍNDICE DE RUGOSIDADE - EIXO DA PISTA  
 ESCALA VERTICAL - 1 cm = 250 mm / km  
 ESCALA HORIZONTAL - 1 cm = 180 m

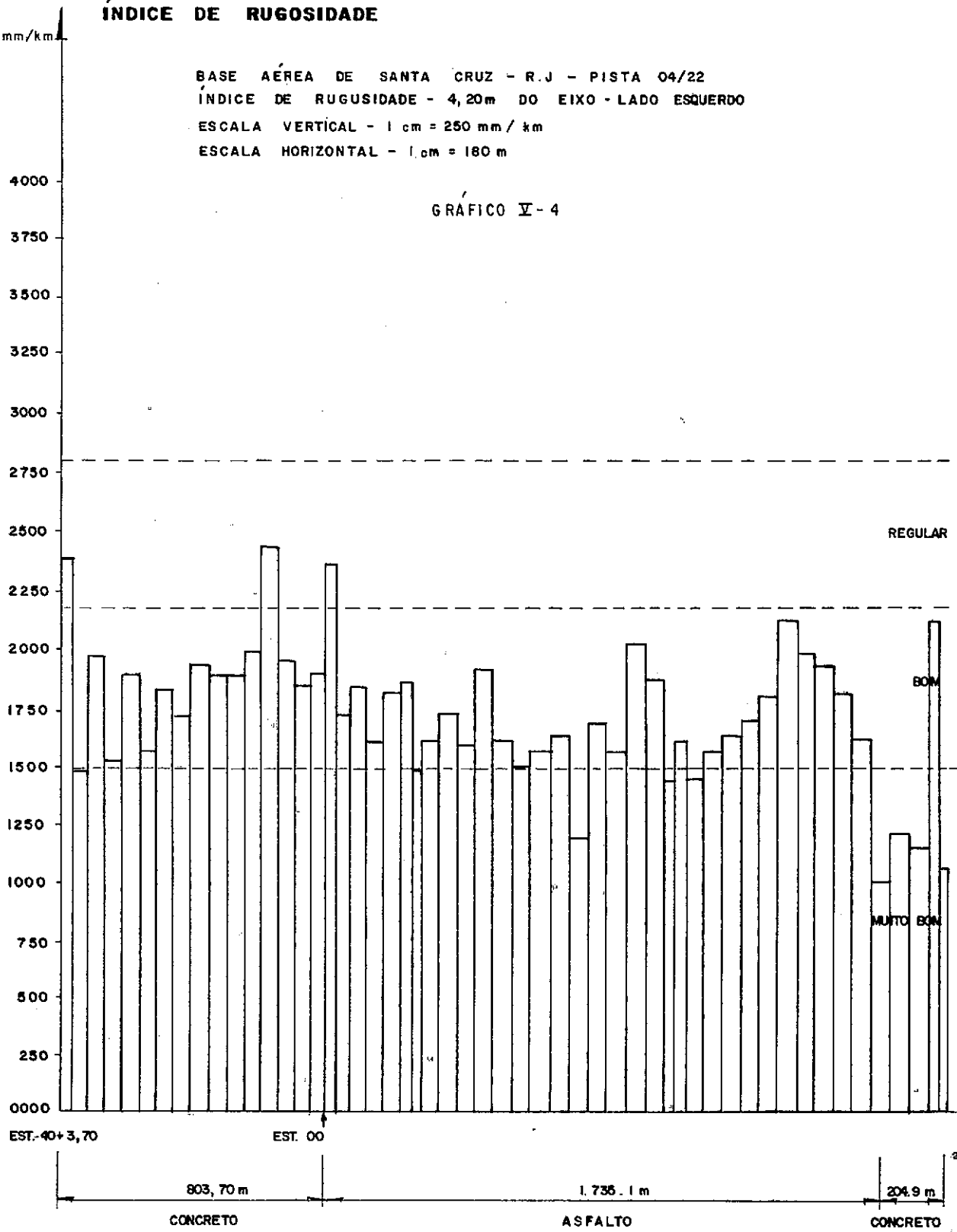
GRÁFICO Y-3



# ÍNDICE DE RUGOSIDADE

BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - R.J. - PISTA 04/22  
 ÍNDICE DE RUGOSIDADE - 4,20m DO EIXO - LADO ESQUERDO  
 ESCALA VERTICAL - 1 cm = 250 mm / km  
 ESCALA HORIZONTAL - 1 cm = 180 m

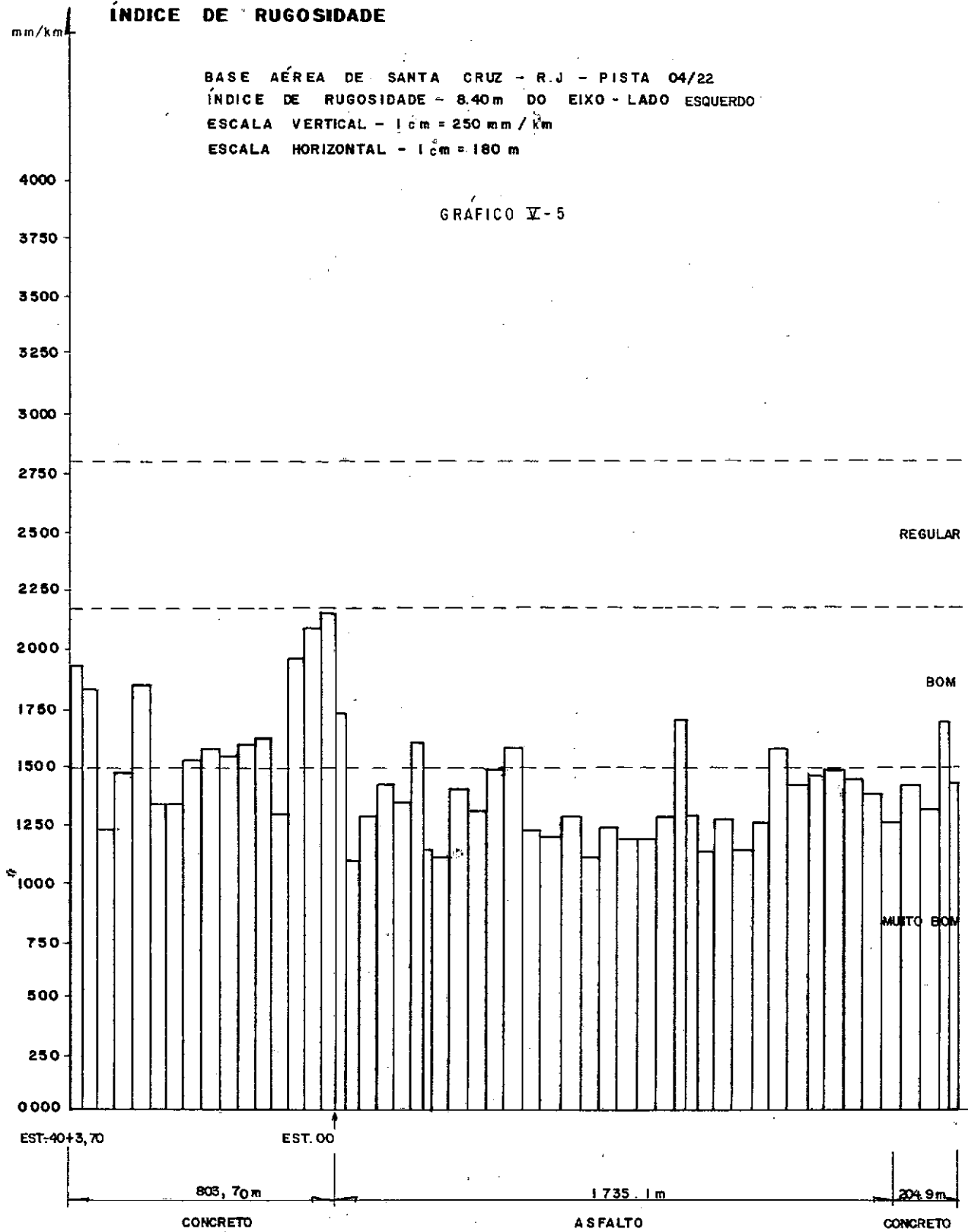
GRÁFICO V-4

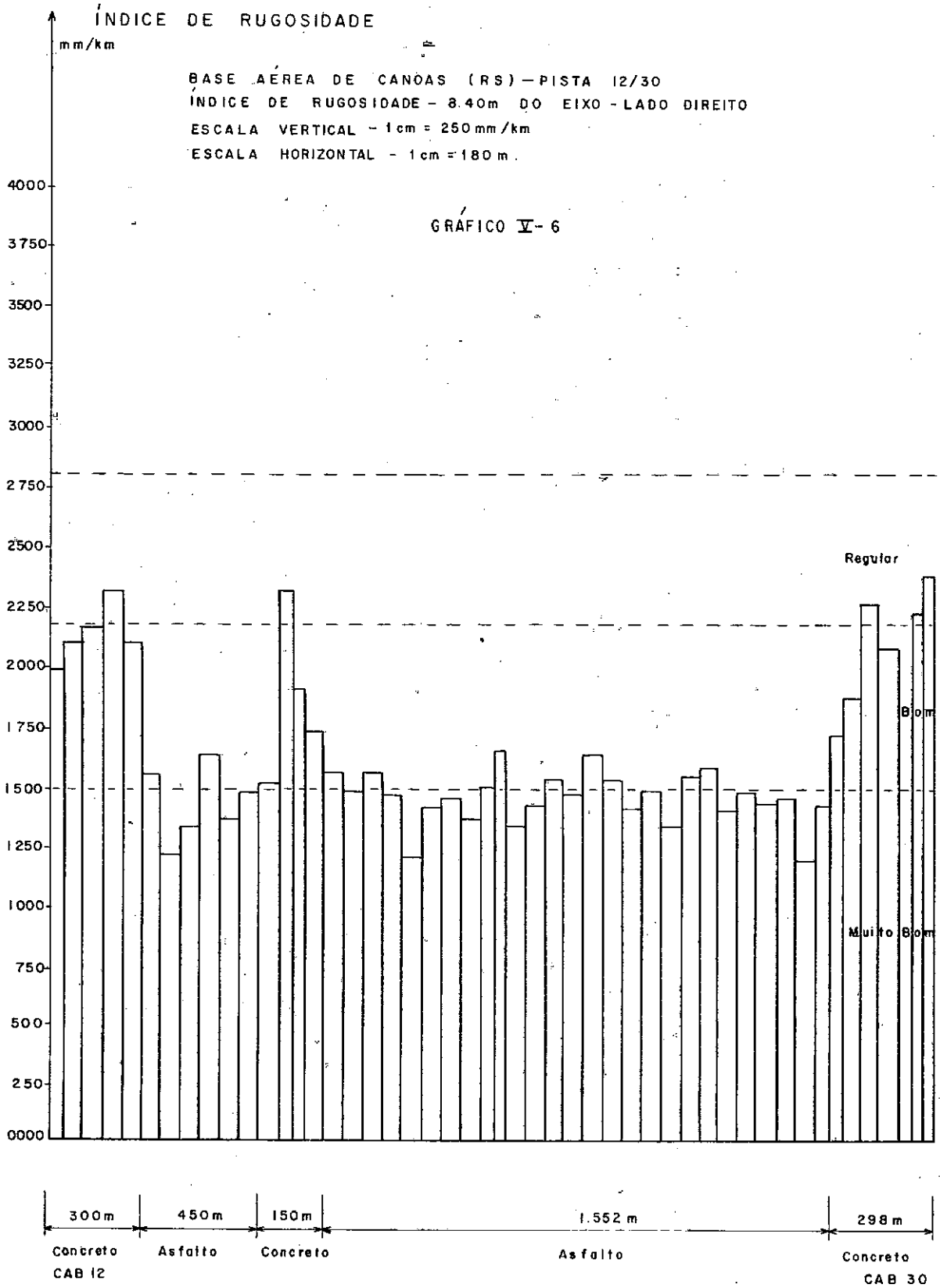


# ÍNDICE DE RUGOSIDADE

BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - R.J. - PISTA 04/22  
 ÍNDICE DE RUGOSIDADE = 8.40 m DO EIXO - LADO ESQUERDO  
 ESCALA VERTICAL - 1 cm = 250 mm / km  
 ESCALA HORIZONTAL - 1 cm = 180 m

GRÁFICO V-5





## ÍNDICE DE RUGOSIDADE

mm/km

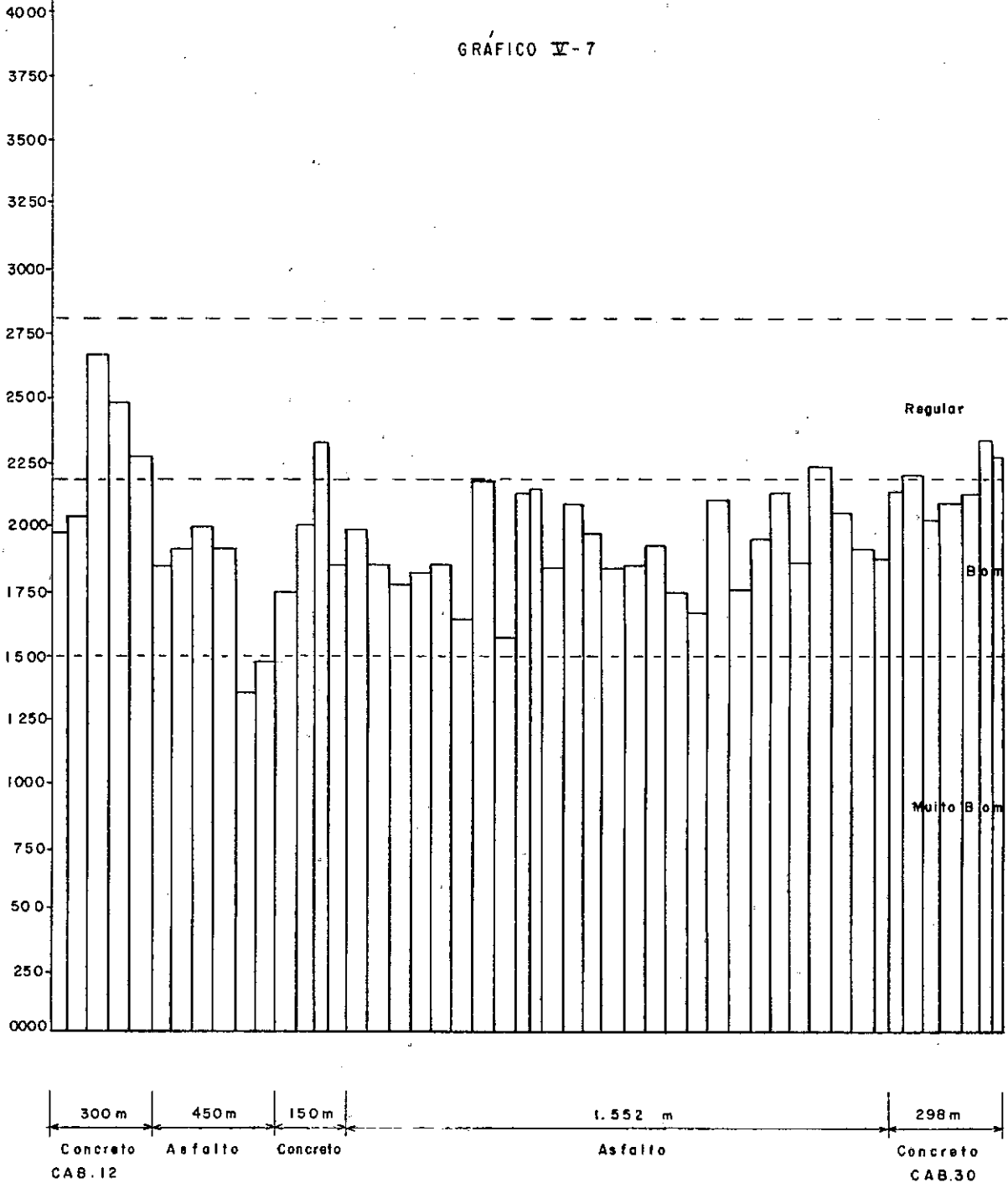
BASE AÉREA DE CANOAS (RS) - PISTA 12/30.

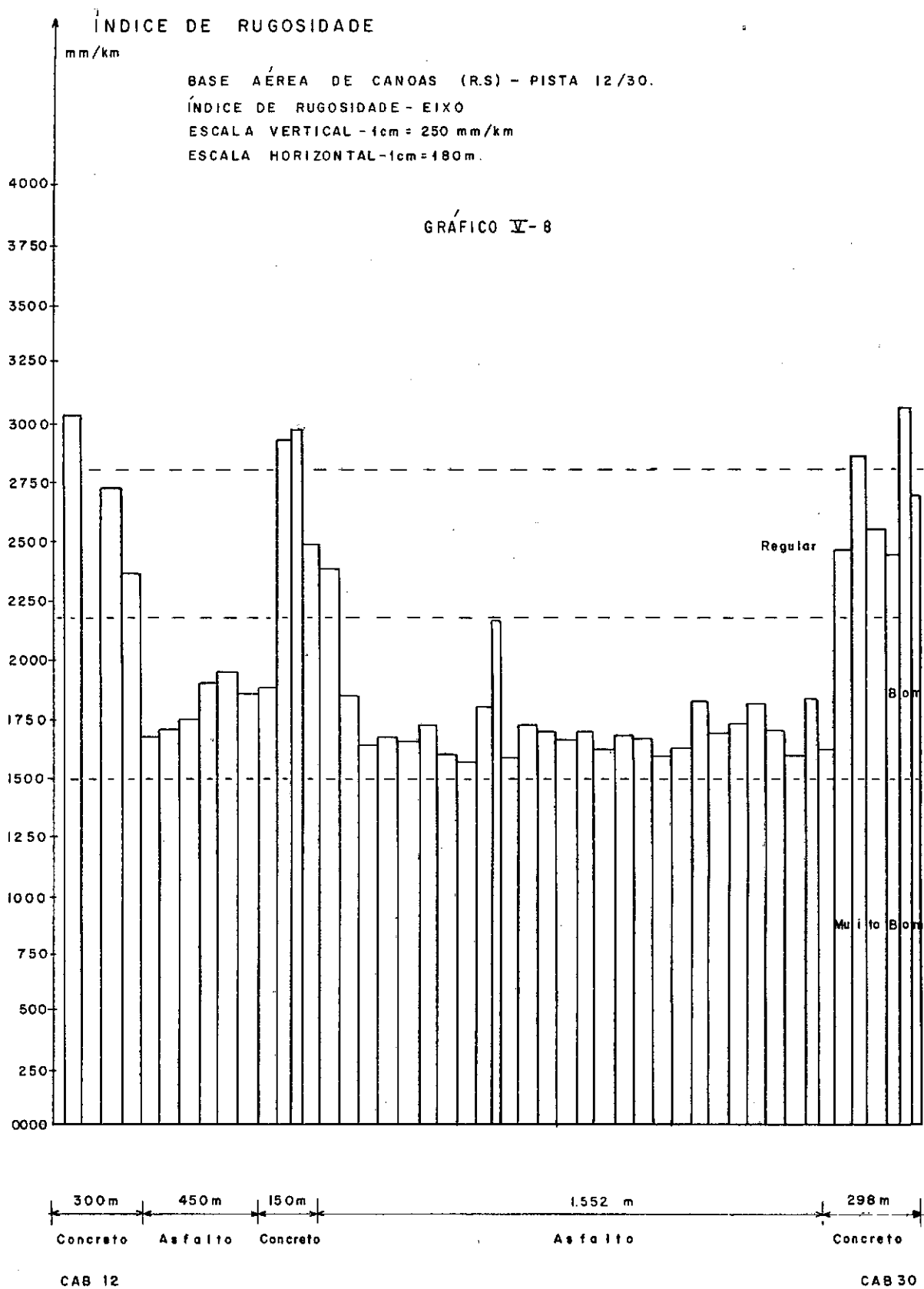
ÍNDICE DE RUGOSIDADE - 4.20 m DO EIXO - LADO DIREITO

ESCALA VERTICAL - 1 cm = 250 mm/km

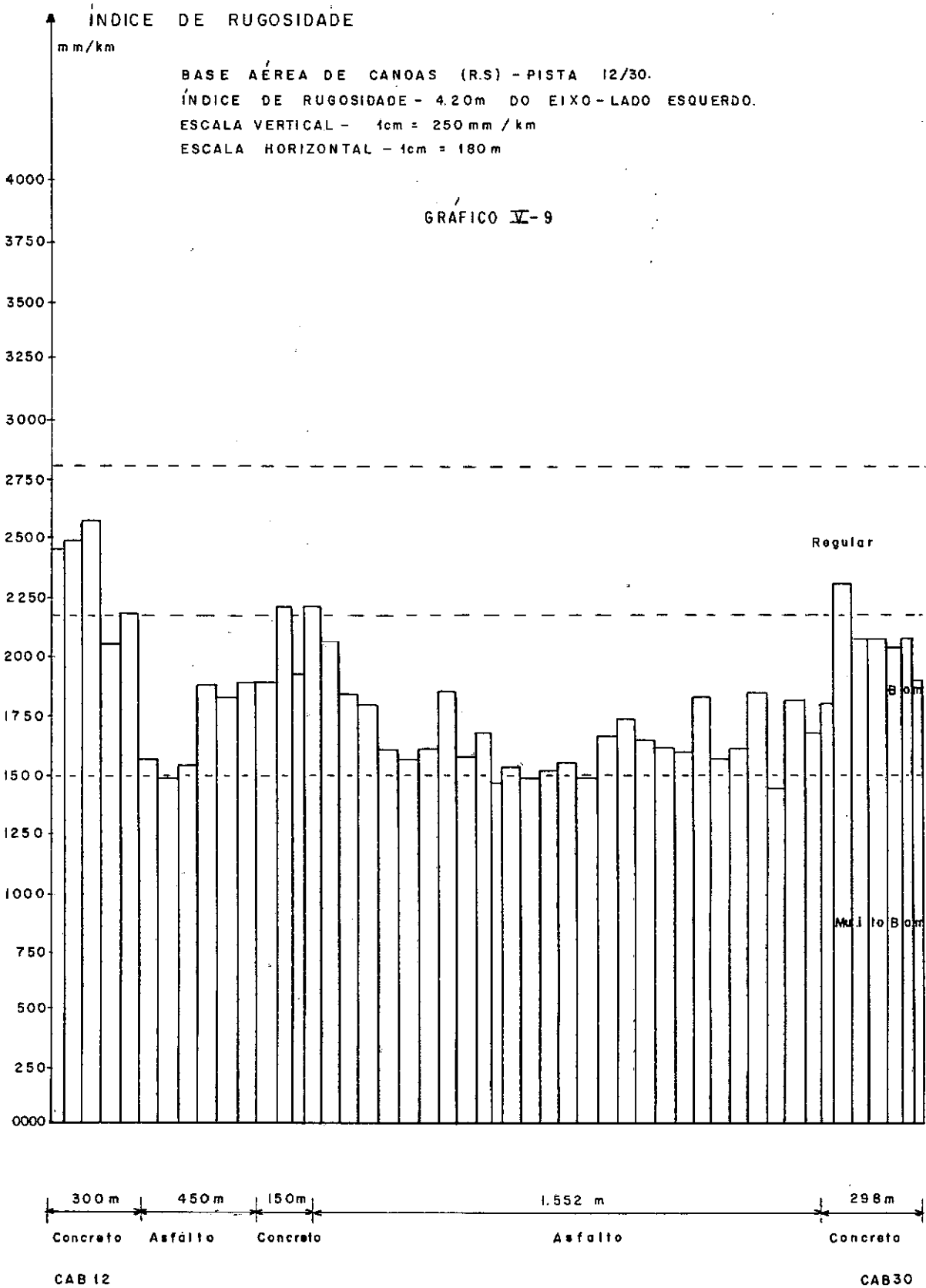
ESCALA HORIZONTAL - 1 cm = 180 m.

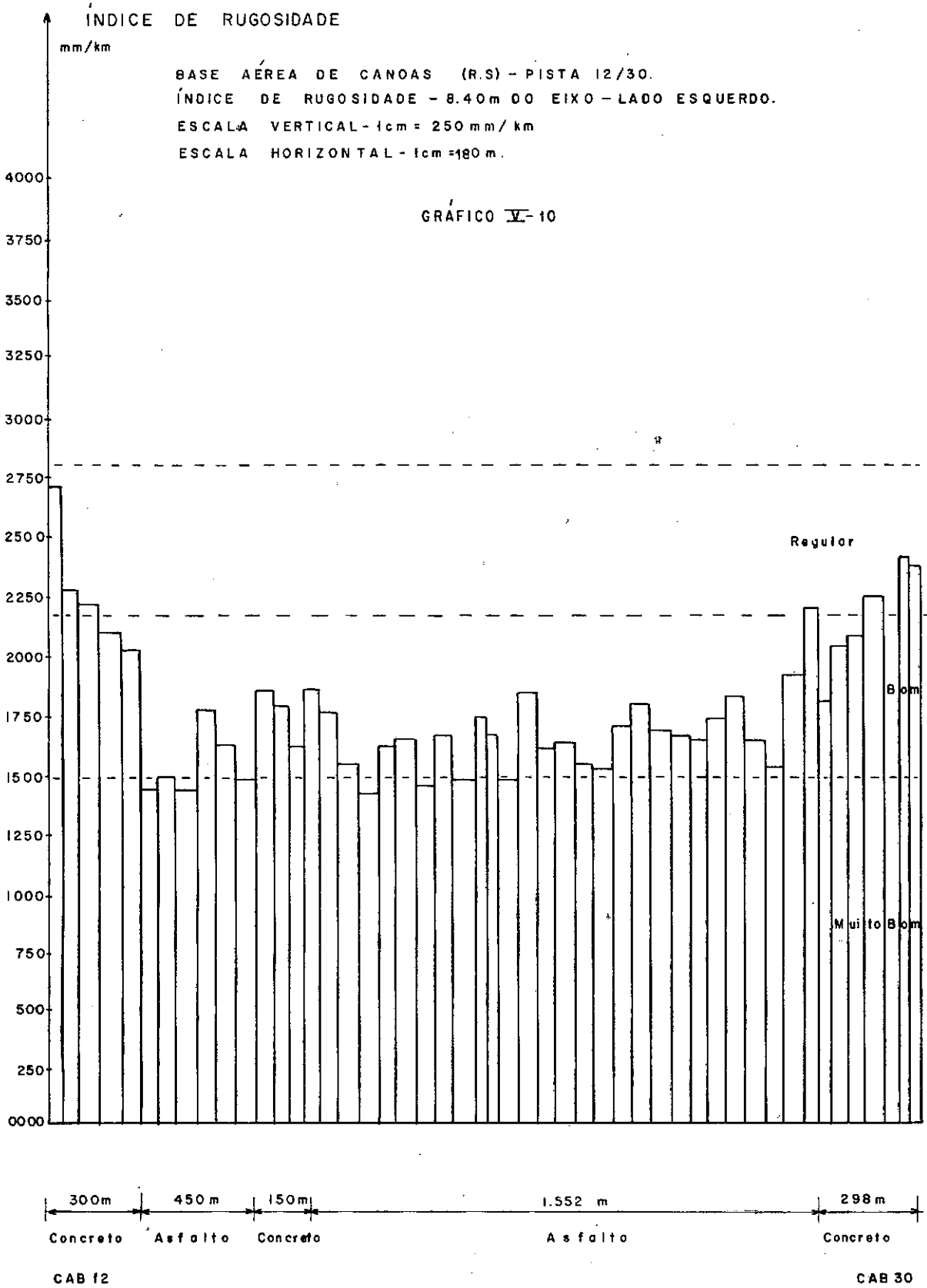
GRÁFICO V-7











## CAPÍTULO VI

ESTUDOS DE IRREGULARIDADES DESENVOLVIDOS A  
PARTIR DO NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO  
FEITO DE METRO EM METRO

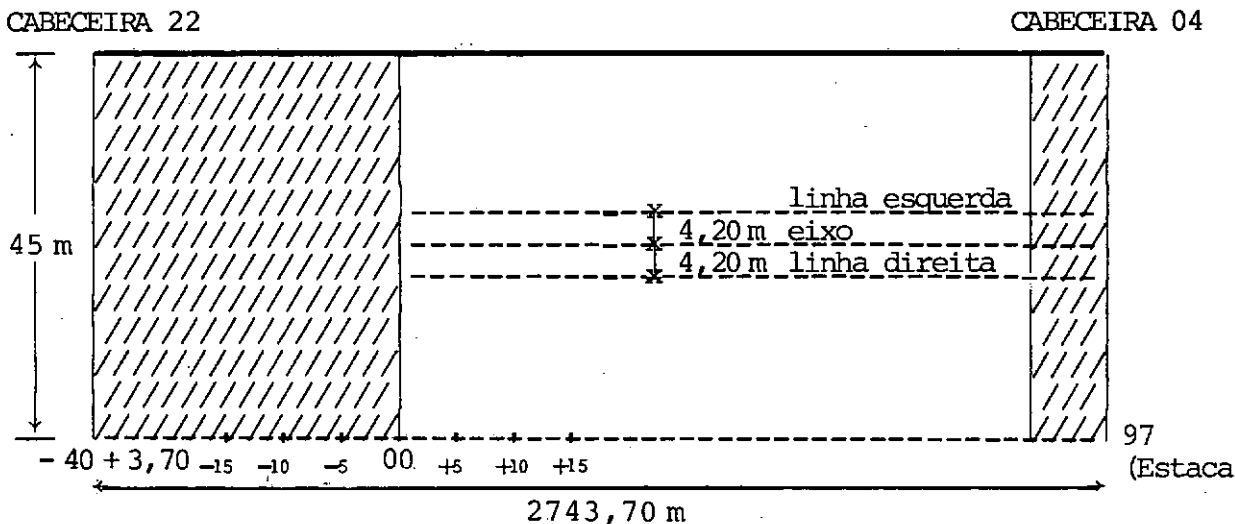
Os trabalhos de nivelamento topográfico foram desenvolvidos no mês de novembro de 1980, para as pistas de pouso das Bases Aéreas de Santa Cruz (RJ) e Canoas (RS).

Estudaram-se três (03) linhas de nivelamento (no eixo e a 4,20 m à esquerda e à direita do eixo) no caso de Santa Cruz e apenas duas linhas (no eixo e a 4,20 m à esquerda do eixo), para o caso de Canoas, obviamente devido a maiores dificuldades de deslocamento de pessoal e equipamentos para o sul do país. O esquema das linhas estudadas pode ser visto nas FIGURAS VI-1.A e VI-1.B.

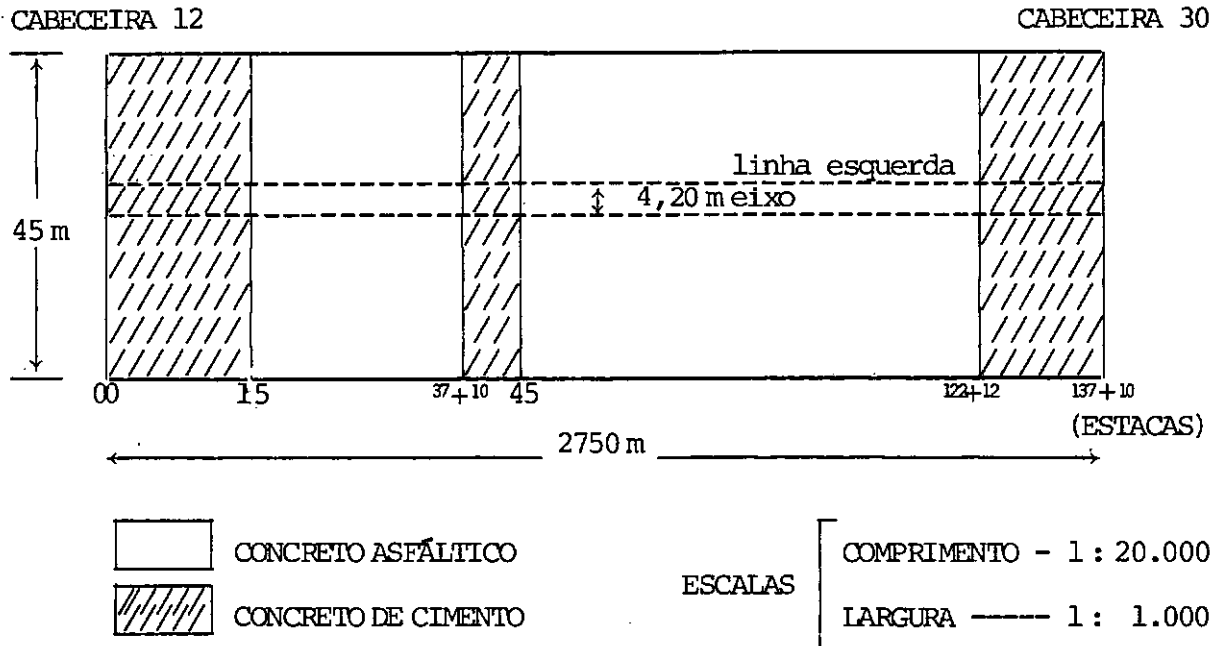
FIGURA VI-1

## DISPOSIÇÃO DAS LINHAS DE NIVELAMENTO ESTUDADAS

VI-1.A - Pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (BASC - RJ)



## VI-1.B - Pista de pouso da Base Aérea de Canoas. (BACO - RS)



Por se julgar que as reclamações dos pilotos eram apenas a partir da estaca 00, não se fez nivelamento topográfico nos 803,70 m iniciais (estaca - 40+3,70 à estaca 00) da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz.

VI.1 - ESPAÇAMENTO ADOTADO

O intervalo de amostragem (nivelamento) adotado foi de metro em metro, embora vários autores tenham empregado o espaçamento de 0,61m (2 pés) noutros países (GERARDI<sup>5</sup>, HALL & KOPPELSON<sup>7</sup>, HOUBOLT<sup>12</sup>, HOUBOLT *et al*<sup>13</sup>, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, MORRIS<sup>17, 18</sup>, MORRIS & STICKLE<sup>20</sup>, WALLS *et al*<sup>34</sup>).

Entretanto YANG<sup>35</sup> afirma que o menor comprimento de onda significativa (alta frequência) esteja na faixa de 4 a 8 pés (1,22 m a 2,44 m) para operações de aeronaves no solo, onde a velocidade varia de 3 a 5 nós (3,50 a 6,00 mph ou 1,43 a 2,44 m/s) e frequência fundamental variando de 1 a 1,5 cps. Sendo assim, com base no teorema de amostragem em comunicações (BLACKMAN & TUKEY<sup>2</sup>, WALLS *et al*<sup>34</sup>, YANG<sup>35</sup>), e espaçamento entre os pontos

de amostragem (nivelamento) deve ser a metade do comprimento de onda de interesse, ou seja, de 2 a 4 pés (0,61 a 1,22 m), estando portanto a intervalo de 1 m enquadrado nesta faixa.

VI-2      ESTUDO DAS BACIAS ENCONTRADAS NO DESENHO DOS PERFIS TOPOGRÁFICOS GEOMÉTRICOS

Inicialmente, fez-se um levantamento quanto ao comprimento médio da CORDA das BACIAS e quanto às amplitudes (duplas amplitudes) máximas médias, separadamente para baicas côncavas para cima ou para baixo, em trechos de cinco (05) estacas, ou 100 m de pista, cujos resultados são apresentados nas TABELAS VI-1 (BASC - RJ) e VI-2 (BACO - RS). Posteriormente, com a intenção apenas de se poder comparar as características das superfícies de cada pista, calculou-se o número de BACIAS, independentemente do sentido da concavidade, nos mesmos trechos e os dados foram transformados em número de BACIAS / 100 m de pista, segundo classes de 2 m, cujos resultados podem ser apreciados nas TABELAS VI-3 (BASC - RJ) e VI-4 (BACO - RS).

Nesses estudos, deixou-se de considerar BACIAS muito grandes, compostas de várias BACIAS menores. Entretanto, nessa situação, foram encontradas BACIAS com CORDAS de até 300 m e amplitudes máximas de até 16,3 cm, como pode ser verificado na TABELA VI-5.

Apresentam-se, também, nos GRÁFICOS VI-A (BASC - RJ) e VI-B (BACO - RS), os números de ocorrências de BACIAS, segundo classes de 2 m para cada linha estudada.

TABELA VI.1 - (BASC-RJ) - COMPRIMENTO MÉDIO DE "BACIAS" EM CADA TRECHO DE  
05 ESTACAS (100m) E AMPLITUDE MÉDIA MÁXIMA (2A)

ESTACAS	LINHA ESQUERDA				EIXO				LINHA DIREITA			
	Concavid. p/ cima		Concavid. p/baixo		Concavid. p/ cima		Concavid. p/baixo		Concavid. p/ cima		Concavid. p/baixo	
	"BACIA"	AMPL (2A)	"BACIA"	AMPL (2A)	"BACIA"	AMPL (2A)	"BACIA"	AMPL (2A)	"BACIA"	AMPL (2A)	"BACIA"	AMPL (2A)
	m	cm	m	cm	m	cm	m	cm	m	cm	m	cm
00 a 05	7,38	0,79	8,00	0,86	10,33	1,07	11,22	1,09	15,20	1,20	17,80	1,56
05 a 10	10,14	0,97	13,29	0,90	15,29	1,00	11,57	0,93	11,38	0,85	13,38	0,85
10 a 15	9,88	0,84	9,88	0,85	17,75	1,13	19,00	1,28	10,80	0,96	16,20	1,14
15 a 20	7,45	0,73	8,55	0,81	11,13	0,80	11,63	0,81	9,30	0,57	9,60	0,66
20 a 25	6,89	0,77	6,78	0,78	11,89	0,63	10,56	0,62	7,20	0,68	8,90	0,70
25 a 30	16,60	0,96	22,60	1,23	14,14	0,94	12,00	1,00	10,63	0,73	11,63	0,73
30 a 35	19,67	1,43	28,00	1,00	9,00	0,62	11,50	0,70	11,00	0,66	13,14	0,70
35 a 40	7,50	0,68	8,08	0,73	13,56	0,88	11,56	0,77	15,20	0,78	14,80	0,82
40 a 45	6,64	0,76	7,29	0,79	12,33	1,07	11,50	0,97	10,00	1,13	11,57	1,03
45 a 50	17,00	1,40	17,80	1,26	9,30	0,71	9,70	0,73	10,44	0,90	10,33	0,97
50 a 55	8,33	0,94	9,89	0,82	9,80	0,85	9,20	0,88	7,08	0,89	8,42	0,96
55 a 60	9,50	0,86	10,80	0,88	12,71	0,76	12,57	0,77	4,26	0,63	4,35	0,65
60 a 65	8,44	0,87	8,11	0,82	10,18	0,82	9,64	0,82	9,18	0,99	8,91	0,89
65 a 70	23,60	1,60	22,40	1,60	11,44	1,02	11,44	1,01	8,86	0,93	10,43	1,04
70 a 75	6,50	1,00	7,20	1,05	10,00	0,97	10,60	0,98	6,77	0,56	7,54	0,62
75 a 80	11,75	1,16	10,88	1,19	6,83	0,73	7,08	0,69	6,36	0,64	6,79	0,69
80 a 85	16,33	1,73	13,67	1,20	10,30	1,23	8,40	1,19	9,25	1,12	7,58	0,85
85 a 90	10,22	0,81	11,44	1,13	12,00	0,79	16,14	1,37	4,67	0,39	3,60	0,33
$\bar{X}$ DO ASFALTO	11,32	1,02	12,48	1,00	11,55	0,89	11,40	0,92	9,32	0,81	10,28	0,84
90 a 95	6,80	0,32	8,20	0,32					6,33	0,40	7,33	0,41
95 a 97	5,80	0,40	8,40	0,48	6,36	0,36	6,79	0,35	5,20	0,62	6,40	0,46
$\bar{X}$ DO CONCRETO	6,30	0,36	8,30	0,40	6,36	0,36	6,79	0,35	5,77	0,51	6,87	0,44
$\bar{X}$ DA PISTA	10,82	0,95	12,06	0,94	11,28	0,86	11,16	0,89	8,97	0,78	9,94	0,80

TABELA VI.2 - (BACO-RS) - COMPRIMENTO MÉDIO DE "BACIAS" EM CADA TRECHO DE  
05 ESTACAS (100m) E AMPLITUDE MÉDIA MÁXIMA

ESTACAS	LINHA ESQUERDA À 4,20m DO EIXO				EIXO				TIPO DE REVESTIMENTO
	Concavid. p/cima		Concavid. p/baixo		Concavid. p/cima		Concavid. p/baixo		
	"BACIA" m	AMPL (2A) cm	"BACIA" m	AMPL (2A) cm	"BACIA" m	AMPL (2A) cm	"BACIA" m	AMPL (2A) cm	
00 a 05	5,67	0,61	7,00	0,66	5,00	0,46	5,50	0,48	CONCRETO CIMENTO
05 a 10	5,53	0,59	5,71	0,59	4,90	0,67	5,00	0,70	
10 a 15	4,65	0,63	5,05	0,61	3,88	0,40	3,40	0,40	
MÉDIA DO TRECHO	5,28	0,61	5,92	0,62	4,59	0,51	4,63	0,53	
15 a 20	11,14	0,77	11,71	0,79	4,40	0,35	4,73	0,41	CONCRETO ASFÁLTICO
20 a 25	7,75	0,54	7,75	0,53	6,29	0,46	6,64	0,49	
25 a 30	6,46	0,58	7,54	0,60	7,00	0,78	7,85	0,86	
30 a 35	5,82	0,49	8,00	0,54	7,08	0,53	7,42	0,57	
35 a 37+10	6,60	0,68	6,83	0,87	9,20	0,80	8,60	0,82	
MÉDIA DO TRECHO*	7,33	0,59	8,20	0,63	6,37	0,55	6,75	0,60	
31+10 a 40	5,56	0,56	5,25	0,53	3,62	0,52	4,00	0,55	CONCRETO CIMENTO
40 a 45	3,86	0,46	4,48	0,49	3,82	0,49	4,18	0,51	
MÉDIA DO TRECHO*	4,37	0,49	4,69	0,50	3,75	0,50	4,11	0,43	
45 a 50	11,22	0,77	10,22	0,86	9,64	0,94	9,82	0,90	CONCRETO ASFÁLTICO
50 a 55	18,00	0,95	23,00	1,20	12,00	0,73	11,14	0,70	
55 a 60	13,00	1,03	22,50	1,10	7,70	0,55	2,40	0,54	
60 a 65	13,80	0,72	16,80	0,86	10,71	0,63	11,71	0,70	
65 a 70	14,33	0,97	16,33	1,07	8,90	0,69	8,30	0,60	
70 a 75	13,14	0,89	13,00	0,86	6,67	0,39	6,83	0,43	
75 a 80	10,57	0,57	15,00	0,69	4,14	0,35	3,91	0,35	
80 a 85	13,83	1,15	15,33	1,05	6,57	0,51	7,21	0,52	

ESTACAS	LINHA ESQUERDA À 4,20m DO EIXO				EIXO				TIPO DE REVESTIMENTO
	Concavid. p/ cima		Concavid. p/baixo		Concavid. p/ cima		Concavid. p/baixo		
	"BACIA" m	AMPL (2A) cm	"BACIA" m	AMPL (2A) cm	"BACIA" m	AMPL (2A) cm	"BACIA" m	AMPL (2A) cm	
85 a 90	11,86	0,76	13,57	0,81	7,56	0,71	7,33	0,68	CONCRETO ASFÁLTICO
90 a 95	8,88	0,54	11,13	0,49	6,67	0,57	6,75	0,52	
95 a 100	14,00	0,83	13,67	0,92	4,53	0,32	4,84	0,35	
100 a 105	6,00	0,37	6,50	0,39	6,25	0,47	7,50	0,50	
105 a 110	10,40	0,53	9,60	0,47	5,71	0,42	6,00	0,46	
110 a 115	12,50	0,77	14,00	0,78	7,75	0,59	9,00	0,82	
115 a 122+12	9,92	0,66	10,08	0,66	8,44	0,64	8,75	0,69	
MÉDIA DO TRECHO*	11,45	0,72	12,83	1,04	7,01	0,50	7,30	0,55	
122+12 a 125	4,30	0,42	3,11	0,38	4,18	0,53	4,18	0,52	CONCRETO CIMENTO
125 a 130	4,61	0,43	4,83	0,43	4,80	0,52	4,80	0,51	
130 a 135	5,47	0,47	5,47	0,49	4,55	0,46	4,55	0,50	
135 a 137+10	4,11	0,39	4,20	0,38	6,14	0,71	4,57	0,60	
MÉDIA DO TRECHO*	4,71	0,43	4,60	0,43	4,75	0,52	4,57	0,52	
$\bar{X}$ DO CONCRETO*	4,82	0,50	5,06	0,51	4,47	0,51	4,49	0,50	
$\bar{X}$ DO ASFALTO*	10,42	0,69	11,67	0,94	6,85	0,51	7,16	0,56	
$\bar{X}$ DA PISTA*	8,68	0,63	9,62	0,81	6,11	0,51	6,33	0,54	



TABELA VI-3 - (BASC - RJ) - NÚMERO DE BACIAS / 100 m DE PISTA, SEGUNDO  
CLASSES DE COMPRIMENTO DE 2 m ——— 4,20 m DO EIXO (LADO ESQUERDO)

SUBTRECHOS A PARTIR DA CAB 22	CLASSES DE COMPRIMENTO DAS BACIAS EM m											
	2 e 3	4 e 5	6 e 7	8 e 9	10 e 11	12 e 13	14 e 15	16 e 17	18 e 19	20 e 21	22 e 23	24 e 25
ASFALTO EST 00 à EST 86 + 15	1,15	3,00	2,82	3,17	1,84	1,21	0,81	0,63	0,75	0,17	0,12	0,17
CONCRETO EST 86 + 15 à EST 97	5,86	4,88	3,42	2,93	0,98	0,98	1,95	0,49	-	-	-	-

E I X O

SUBTRECHOS A PARTIR DA CAB 22	CLASSES DE COMPRIMENTO DAS BACIAS EM m											
	2 e 3	4 e 5	6 e 7	8 e 9	10 e 11	12 e 13	14 e 15	16 e 17	18 e 19	20 e 21	22 e 23	24 e 25
ASFALTO EST 00 à EST 86 + 15	0,17	0,98	1,96	3,57	5,76	1,33	0,81	0,35	0,63	0,46	-	0,17
CONCRETO EST 86 + 15 à EST 97	3,42	5,37	4,39	1,46	1,46	1,46	0,49	-	-	-	-	0,98

4,20 m DO EIXO (LADO DIREITO)

SUBTRECHOS A PARTIR DA CAB 22	CLASSES DE COMPRIMENTO DAS BACIAS EM m											
	2 e 3	4 e 5	6 e 7	8 e 9	10 e 11	12 e 13	14 e 15	16 e 17	18 e 19	20 e 21	22 e 23	24 e 25
ASFALTO EST 00 à EST 86 + 15	2,31	3,34	3,36	2,36	3,57	1,38	0,81	0,40	0,35	0,52	0,17	0,06
CONCRETO EST 86 + 15 à EST 97	11,7	6,38	6,38	1,95	2,44	0,98	-	-	-	-	-	0,49

TABELA VI-4. - (BACO - RS) - NÚMERO DE BACIAS / 100 m DE PISTA, SEGUNDO CLASSES DE COMPRIMENTOS DE  
2m \_\_\_\_\_ A 4,20 m DO EIXO (LADO ESQUERDO)

SUBTRECHOS A PARTIR DA CAB 12	CLASSES DE COMPRIMENTO DAS BACIAS EM m										
	2 e 3	4 e 5	6 e 7	8 e 9	10 e 11	12 e 13	14 e 15	16 e 17	18 e 19	20 e 21	22 e 23
CONCRETO - Est 00 à 15	7,33	10,33	9,33	3,33	0,67	1,67	-	-	-	-	-
ASFALTO - Est 15 à 37 + 10	4,89	4,67	2,22	2,67	2,22	2,00	1,11	0,89	0,44	0,22	0,22
CONCRETO - Est 37 + 10 à 45	11,33	19,33	6,67	0,67	1,33	-	-	-	-	-	-
ASFALTO - Est 45 à 122 + 12	1,29	1,10	1,35	1,61	2,13	1,48	1,10	1,03	0,84	0,52	0,64
CONCRETO - Est 122 + 12 a 137 + 10	8,72	19,80	2,68	2,35	0,67	0,34	0,34	-	-	-	-

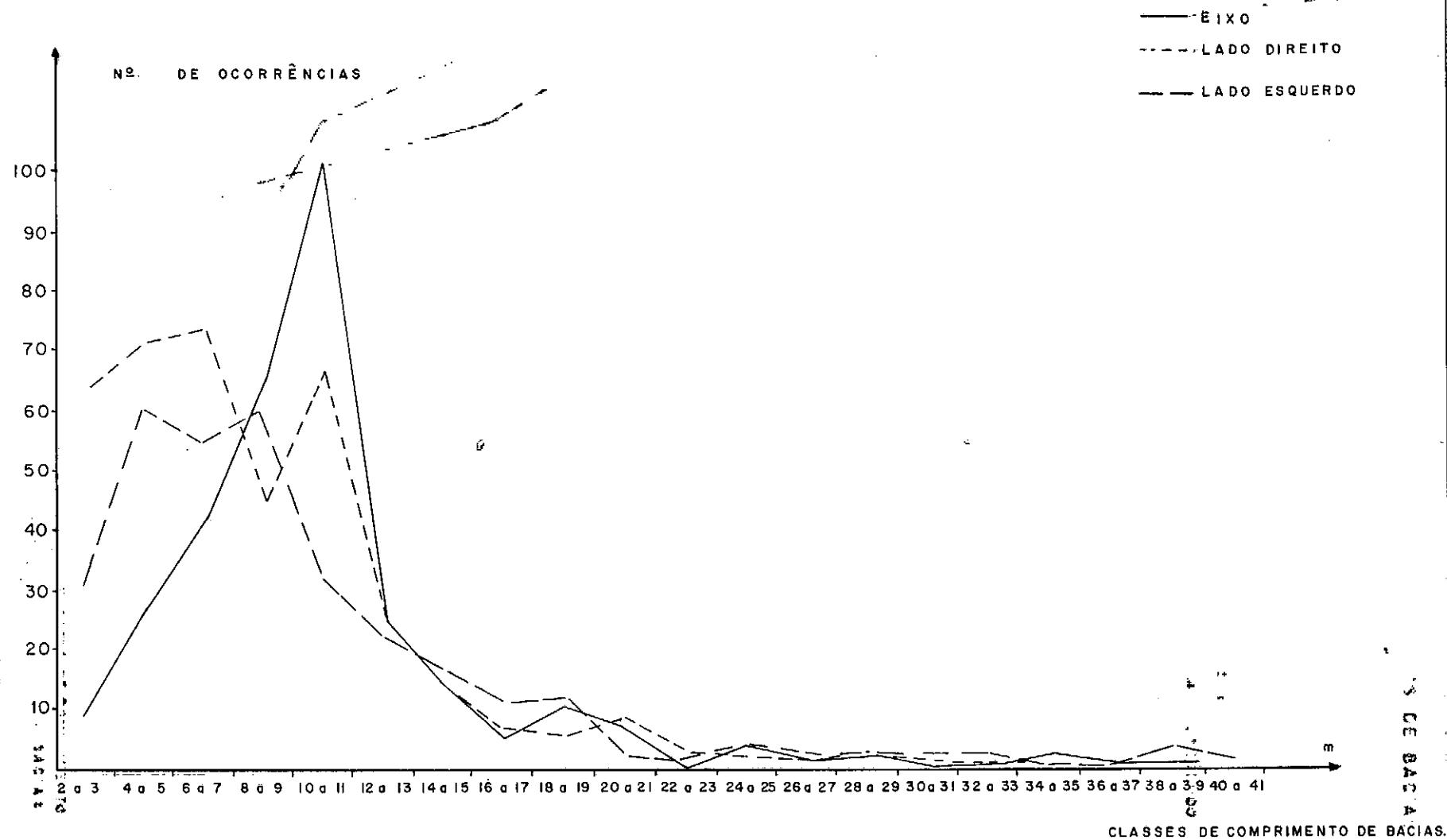
E I X O

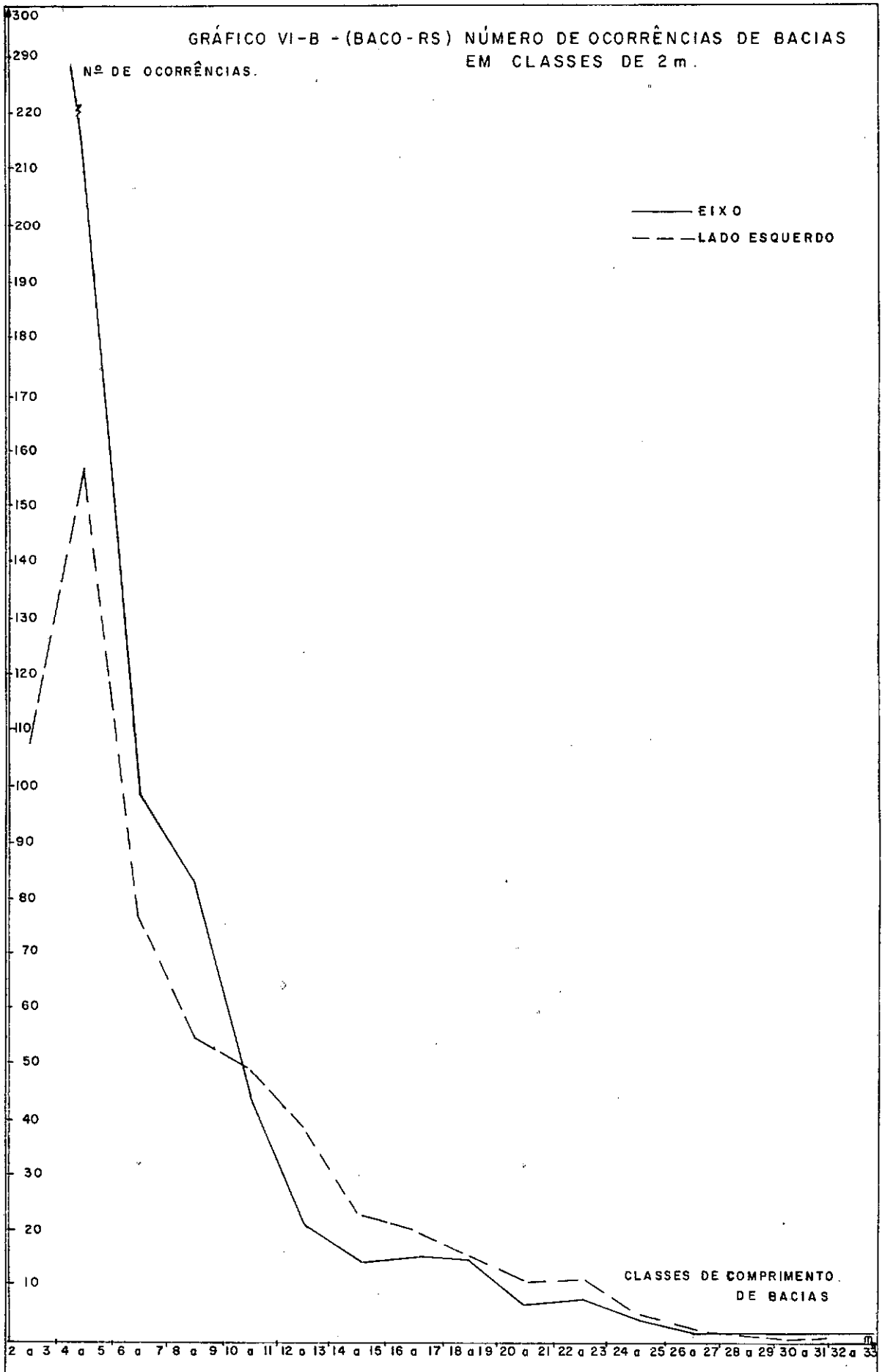
SUBTRECHOS A PARTIR DA CAB 12	CLASSES DE COMPRIMENTO DAS BACIAS EM m										
	2 e 3	4 e 5	6 e 7	8 e 9	10 e 11	12 e 13	14 e 15	16 e 17	18 e 19	20 e 21	22 e 23
CONCRETO - Est 00 à 15	17,00	13,67	5,00	4,00	1,00	0,33	-	-	-	-	-
ASFALTO - Est 15 à 37 + 10	10,44	3,56	4,00	2,67	1,11	1,33	1,11	0,67	0,67	0,44	-
CONCRETO - Est 37 + 10 à 45	14,67	28,00	4,00	-	-	-	-	-	-	-	-
ASFALTO - Est 45 à 122 + 12	7,67	4,77	2,90	3,09	1,93	0,84	0,45	0,71	0,58	0,26	0,45
CONCRETO - Est 122 + 12 a 137 + 10	16,44	13,42	4,70	3,69	1,68	0,34	-	-	-	-	-

TABELA VI-5 - COMPRIMENTOS MÁXIMOS DE BACIAS (CORDAS) E RESPECTIVAS AMPLITUDES (FLEXAS)  
EM CADA LINHA ESTUDADA NAS DUAS PISTAS (BASC - RJ E BACO - RS)

PISTA	POSIÇÃO DO NIVELAMENTO	C O N C A V I D A D E					
		PARA BAIXO			PARA CIMA		
		COMPRIMENTO MÁXIMO (m)	AMPLITUDE MÁXIMA (cm) (2A)	LOCALIZAÇÃO (estacas)	COMPRIMENTO MÁXIMO (m)	AMPLITUDE MÁXIMA (cm) (2A)	LOCALIZAÇÃO (estacas)
B A S C R J	LINHA DIREITA	180	6,3	72+15 a 81+15	175	16,3	77+15 a 86+10
	EIXO	110	9,4	84+ a 89+10	300	12,5	37+ 8 a 52+ 8
	LINHA ESQUERDA	124	6,2	33+16 a 41	109	6,8	47 a 52+ 8
B A C O R S	EIXO	56	2,3	56+ 1 a 58+17	69	3,0	88+15 a 92+ 4
	LINHA ESQUERDA	61	2,0	44+15 a 47+16	67	2,9	29+18 a 33+ 5

GRÁFICO VI-A (BASC - RJ) NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DE BÁCIAS EM CLASSES DE 2 m





METODOLOGIA ADAPTADA E DESENVOLVIDA PARA ANÁLISE DOS  
PERFIS TOPOGRÁFICOS GEOMÉTRICOS

Um dos principais métodos empregados para estudos da rugosidade e irregularidades de pavimentos a partir de dados obtidos com nivelamento topográfico, tem sido o emprego de técnicas de análise espectral (HOUBOLT<sup>12</sup>, HOUBOLT *et al*<sup>13</sup>, MORRIS<sup>17,18</sup>, MORRIS & HALL<sup>19</sup>, MORRIS & STICKLE<sup>20</sup>, QUEIROZ<sup>25</sup>, TUNG *et al*<sup>31, 32</sup>, WALLS *et al*<sup>34</sup>), sendo o mais comum a obtenção da densidade de potência espectral que seria a variância encontrada em intervalos de frequência, ou comprimentos de onda conhecidos (HOUBOLT<sup>12</sup>, MORRIS<sup>17</sup>, QUEIROZ<sup>25</sup>, THOMPSON<sup>29</sup>, WALLS *et al*<sup>34</sup>, YANG<sup>36</sup>).

Poder-se-ia, também, empregar a análise espectral para decompôr as irregularidades superficiais do pavimento, em componentes de diversos comprimentos de onda; porém, a interpretação desses resultados seria difícil no estágio atual de nosso conhecimento, principalmente se considerarmos o pequeno acúmulo de experiências adquiridas sobre o assunto, quando não se tem ainda, no Brasil, a determinação das amplitudes das diversas faixas de comprimentos de onda para um grande número de pistas de pouso (QUEIROZ<sup>24</sup>), além da necessidade de um maior domínio na utilização das técnicas computacionais envolvidas nesses estudos.

Diante dessas considerações e limitações, resolveu-se partir de estudos dessa natureza, feitos principalmente por HOUBOLT<sup>12</sup>, apoiando-se também, em parte, no desenvolvimento teórico apresentado no CAPÍTULO III.

O *power spectrum* dos desvios de uma pista, em torno de uma reta média, pode ser representado de acordo com a FIGURA VI-2, onde:

$\phi(w)$  = *power spectrum*

$w$  = frequência espacial (associada com o componente de frequência)

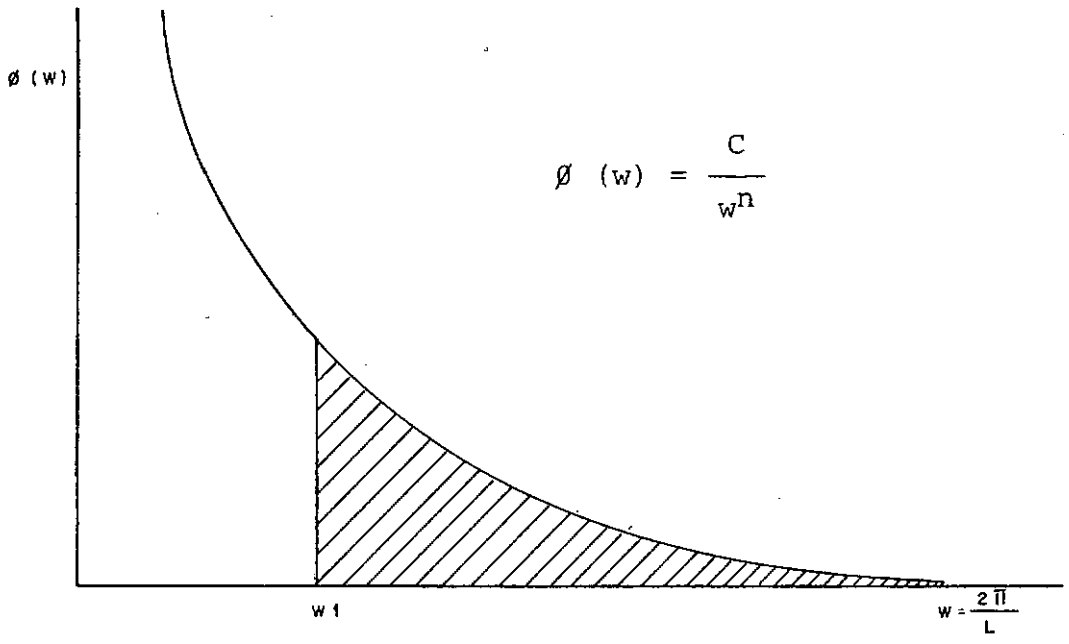
$L$  = comprimento de onda

$L_1$  = menor comprimento de onda considerado de interesse (espaçamento de 2 pés)

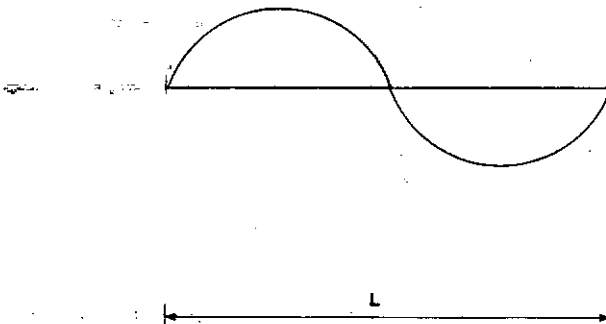
$L_1$  = menor comprimento de onda considerado de interesse (espaçamento de 2 pés)

$$\text{Neste caso, } w_1 = \frac{2\pi}{L_1} = \frac{2\pi}{4} = \frac{\pi}{2} = 1,57 \text{ rad/s}$$

Figura VI- 2. Representação do "power spectrum" dos desvios em relação a reta média de uma pista.



$$\phi(w) = \frac{ft^2}{\text{rad/ft}}$$



O espectro também pode ser representado pela curva  $\phi(w) = \frac{c}{w^n}$  (VI-1), sendo  $c$  e  $n$  constantes (HOUBOLT<sup>12</sup>, YANG<sup>36</sup>).

Uma das propriedades do espectro é que a área abaixo da curva é igual ao valor do quadrado médio dos desvios. (HOUBOLT<sup>12</sup>, MORRIS<sup>17</sup>, QUEIROZ<sup>25</sup>, THOMPSON<sup>29</sup>, THOMSON<sup>30</sup>, WALLS *et al*<sup>34</sup> e YANG<sup>36</sup>).

Assim, a área entre  $w_1$  e  $\infty$  (FIGURA VI-2) está associada com o valor do quadrado médio dos desvios contidos num segmento de pista de comprimento  $L_1 = \frac{2\pi}{w_1}$ .

Voltando-se à equação VI-1 e integrando-a nos limites da FIGURA VI-2 ( $w_1$  a  $w = \frac{2\pi}{L_1}$ ):

$$\phi(w) = \frac{c}{w^n} \rightarrow \phi(w) = \int_{w_1}^{\infty} \frac{c}{w^n} dw$$

$$\phi(w) = \int_{w_1}^{\infty} c \times w^{-n} dw \rightarrow \phi(w) = \left[ c \left( \frac{w^{-n+1}}{1-n} \right) \right]_{w_1}^{\infty} = \frac{2\pi}{L_1}$$

$$\phi(w) = c \times \left( -\frac{\left( \frac{2\pi}{L_1} \right)^{1-n}}{1-n} \right) \rightarrow \phi(w) = \frac{-c}{1-n} \times \left( \frac{2\pi}{L_1} \right)^{1-n}$$

Como  $\phi(w)$  é a variância ( $\sigma^2$ ):

$$\sigma^2 = \frac{c}{n-1} \left( \frac{2\pi}{L_1} \right) \times \left( \frac{L_1}{2\pi} \right)^n \rightarrow \sigma^2 = \frac{c}{n-1} \left( \frac{2\pi}{L_1} \right) \times \left[ \frac{L_1^n}{(2\pi)^n} \right]$$

$$\sigma^2 = \frac{c}{n-1} \times \frac{(L_1)^{n-1}}{(2\pi)^{n-1}} \rightarrow \sigma^2 = \frac{c}{n-1} \left( \frac{L_1}{2\pi} \right)^{n-1} \quad (\text{VI-2})$$

O valor do desvio padrão será:

$$\sigma = \left( \frac{c}{n-1} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left( \frac{L_1}{2\pi} \right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (\text{VI-3})$$

A área abaixo do limite inferior do espectro é tão pequena que pode ser desprezada. Já se encontrou, então, o desvio das irregularidades em torno de uma reta média de comprimento  $L_1$ , mas o desvio máximo ( $\sigma'$ ) para esse segmento ainda não foi determinado. Teoria de processos randômicos mostra que es-



se valor pode ser obtido, segundo HOUBOLT<sup>12</sup>, pela relação

$$\sigma' = K \times \sigma \quad (\text{VI-4})$$

K é um fator de forma que depende da natureza das irregularidades. Experiências têm mostrado que o mesmo está em torno do fator de forma de uma onda senoidal pura, cujo valor é  $\sqrt{2}$ . (Vide desenvolvimento no CAPÍTULO III-1.3 — Equação III-9).

Portanto:

$$\sigma' = \sqrt{2} \times \sigma$$

$$\sigma' = \sqrt{2} \times \frac{c}{n-1} \times \left( \frac{L_1}{2\pi} \right)^{n-1} \quad (\text{VI-5})$$

A equação VI-5 pode ser considerada, agora, como um critério de lisura do pavimento. Entretanto, as constantes  $c$  e  $n$  ainda não foram determinadas.

HOUBOLT<sup>12</sup> obteve os espectros para duas pistas. A primeira delas, cuidadosamente construída, de acordo com certas especificações e padrões construtivos, poderia ser considerada um modelo para novas construções de pistas comerciais. Assim, ao analisar o espectro obtido, verificou que os valores de  $c$  e  $n$  para esta curva eram, respectivamente,  $6,7 \times 10^{-6}$  e 2,0.

Levando-se estes valores à equação VI-5:

$$\sigma' = \sqrt{2} \times \frac{6,7 \times 10^{-6}}{2-1} \times \left( \frac{L}{2 \times 3,14} \right)^{2-1}$$

$$\sigma' = \frac{6,7 \times 10^{-6}}{3,14} \times \sqrt{L} \quad \text{obtem-se:}$$

$$\sigma' = 1,46 \times 10^{-3} \sqrt{L} \quad \text{ou} \quad \sigma' = 0,00146 \sqrt{L} \quad (\text{VI-6})$$

(critério CONSTRUÇÃO NOVA)

onde:

$\sigma'$  = desvio padrão máximo em pés

L = comprimento do segmento de pista em pés

A segunda era uma pista de rolamento (táxi), conhecida por ser excessivamente rugosa (muitas irregularidades) para operações de pousos e decolagens. Assim, foi possível verificar o outro extremo. O espectro de uma terceira pista — que HOUBOLT<sup>12</sup> apenas denominou de pista **X** — facilitou sobremaneira o estabelecimento do critério NECESSITA REPAROS, face às experiências decorrentes de operações que nela se processaram. A pista **X**, embora regularmente boa no seu todo, era alvo de reclamações ocasionais durante certos tipos de operações. Estudos indicaram que tais reclamações poderiam estar associadas com o surgimento de comprimentos de ondas no espectro, da ordem de 10 a 20 pés (3 a 6 m).

O critério NECESSITA REPAROS foi obtido pelo traçado de uma curva paralela entre o espectro da pista comercial muito boa (critério CONSTRUÇÃO NOVA) e o espectro da pista de rolamento (irregularidades em excesso), levemente acima do espectro da pista **X**. Casualmente, os desvios foram encontrados para o critério NECESSITA REPAROS, na ordem de  $\sqrt{3}$  vezes os desvios aceitáveis para o critério CONSTRUÇÃO NOVA.

Partindo-se da equação (VI-6):

$$\sigma' = 0,00146 \sqrt{L}$$

$$\sigma' = \sqrt{3} \times \sqrt{L} \times 1,46 \times 10^{-3}$$

$$\sigma' = 2,53 \times 10^{-3} \sqrt{L} \text{ ou } \sigma' = 0,00253 \sqrt{L} \quad (\text{VI-7})$$

chega-se ao critério NECESSITA REPAROS.

#### VI-3.1 EMPREGO DE UM GABARITO DE 1,20 m DE COMPRIMENTO POR 3,0 cm DE ALTURA

A adoção de um GABARITO com essas características, deveu-se a três (03) variáveis diretas e principais, quais sejam:

a) Dimensões que permitissem a avaliação de perfis topográficos de pistas de pouso, obtidos de acordo com as condições apresentadas no CAPÍTULO IV (MATERIAIS E MÉTODOS), principalmente no que diz respeito às escalas vertical e horizontal.

b) Altura a ser considerada, capaz de permitir a avaliação de irregularidades, de acordo com a letra  $\alpha$ , levando-se

em conta a equação VI-7. ( $\sigma' = 0,00253 \sqrt{L}$ )

c) Condição de se eliminar, durante a avaliação, com primentos de onda maiores do que aqueles que puderem vir a ser de interesse para gerações futuras de grandes jatos que, de acordo com LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, apresentariam frequências fundamentais da ordem de 0,5 cps.

Considerando-se uma velocidade de 120 nós, o que equivale a 202 pés/s e frequência de resposta de 0,5 c/s, tem-se:

$$L = \frac{v}{f} \quad (\text{VI-8}), \text{ onde:}$$

$L$  = comprimento de onda em pés

$v$  = velocidade em pés/s

$f$  = frequência fundamental em c/s

O comprimento adotado foi de 1,20 m, que corresponde, de acordo com a letra  $\alpha$ , a 120 m de pista. Assim:

$$120 \text{ m} \div 0,3048 \text{ pés} = 393,70 \text{ pés}$$

Da equação (VI-8):

$$f = \frac{v}{L} \rightarrow f = \frac{202}{393,70} \rightarrow f = 0,51 \text{ c/s,}$$

o que, de certa forma, concorda com as previsões de LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> se elas vierem a se concretizar.

Voltando-se à equação VI-7:

$$\sigma' = 2,53 \times 10^{-3} \times \sqrt{L} \quad (\text{dimensões em pés}) \text{ tem-se:}$$

$$\text{para } L = 120 \text{ m ou } L = 393,70 \text{ pés}$$

$$\sigma' = 2,53 \times 10^{-3} \times \sqrt{393,70}$$

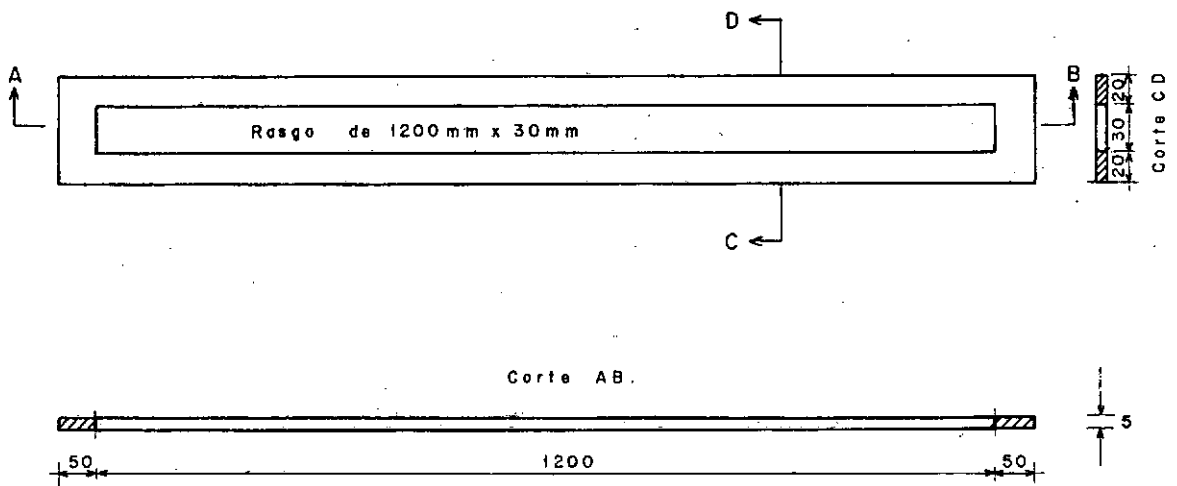
$$\sigma' = 0,0502 \text{ pés ou } \sigma' = 1,53 \text{ cm}$$

Como ao considerar a altura do GABARITO, estar-se-á limitando o valor de uma dupla amplitude, para o caso de uma única onda de 120 m, ou irregularidades que estivessem nesta faixa, o valor  $\sigma'$  seria dobrado. Portanto, a altura seria:

$$2 \times \sigma' = 2 \times 1,53 \text{ cm} \rightarrow 2\sigma' = 3,06 \text{ cm}$$

A altura adotada foi de 3,00 cm.

Figura VI - 3. Esquema do "gabarito" empregado.



Escala Horizontal. 1:100

Escala Vertical. 1:50

Cotas em mm.

As dimensões e características do GABARITO, feito em alumínio anodizado, podem ser apreciadas na FIGURA VI-3.

De posse dos perfis topográficos geométricos, como descritos no CAPÍTULO IV e com o GABARITO, procedeu-se à análise de cada perfil, assinalando-se em planta, conforme FIGURAS VI-4.A e VI-5.A, os trechos considerados críticos, ou seja, os locais ao longo das linhas estudadas nas pistas, onde as irregularidades ultrapassavam o RASGO de 1,20m x 3,00 cm da peça de alumínio (GABARITO). Para isso, bastava fazer correr a faixa de 10 cm de largura (cada perfil topográfico) sobre uma prancheta e sob o GABARITO.

Trata-se de método bastante simples, não se tendo preocupações quanto à variação dos greides das pistas; porém, demanda muito trabalho de prancheta e de escritório.

#### VI-3.2 ANÁLISE DIRETA DOS DADOS ATRAVÉS DO CÁLCULO DOS DESVIOS PADRÕES PARA CADA 120 m DE PISTA

O objetivo principal do desenvolvimento deste método foi verificar se havia uma relação entre as áreas críticas a serem encontradas por ele e aquelas obtidas com o emprego do GABARITO, o que era de se esperar, face aos princípios e desenvolvimentos teóricos conduzidos para se chegar ao GABARITO, com as características descritas no Ítem VI-3.1.

Com esses estudos já em andamento, verificou-se que SONNENBURG<sup>27</sup> havia conduzido pesquisas analisando, dentre outros aspectos, a forma de se obter as irregularidades de uma pista, através da análise direta dos dados de seu perfil. Esse mesmo autor ainda afirma que uma variação substancial no comprimento do trecho do perfil, ou seja, na limitação do comprimento máximo de onda, onde se tenha um grande número de valores (N) a serem analisados, não implica em grandes variações dos desvios padrões.

Como foram desenvolvidos, na parte inicial desta pesquisa, estudos de comprimentos médios de BACIAS e amplitudes máximas médias a cada 100 m, resolveu-se também calcular os desvios padrões para trechos de 100 m (5 estacas) de pista, para eventuais comparações.

As pesquisas de SONNENBURG<sup>27</sup> com 21 pistas, levaram-no a sugerir a seguinte classificação, em termos de irregularidades, baseado nos valores de desvios padrões:

PISTA ACEITÁVEL — desvio padrão ( $\sigma$ ) até 0,32 pol (8,13 mm)

FAIXA DE TRANSIÇÃO - desvio padrão entre 0,32 e 0,36 pol

PISTA RUGOSA — desvio padrão maior do que 0,36 pol (9,15 mm)

Esse critério foi o empregado nos estudos conduzidos com as duas pistas de pouso (BASC - RJ e BACO - RS).

Por serem 120 m de pista, ou mesmo 100 m, trechos relativamente grandes, procurou-se analisar os dados, inicialmente, partindo-se das estacas 00 ou origem de TRECHOS CARACTERÍSTICOS (inícios de concreto cimento, concreto asfáltico ou de variações de greides, etc). Posteriormente, novos cálculos foram feitos, partindo-se 03 estacas (60 m) ou 02 + 10 estacas (50 m) à frente, respectivamente, para as situações de 120 m ou 100 m de pista.

Os resumos das análises estatísticas feitas para os estudos a cada 120 m de pista são apresentados nas TABELAS VI-6.1 a VI-6.10. Da mesma forma, para o caso de cada 100 m de pista, os resultados são apresentados nas TABELAS VI-7.1 a VI-7.10. Partindo-se dessas TABELAS, foram assinaladas em planta (FIGURAS VI-4.B e C e VI-5.B e C), em função dos desvios padrões, os trechos considerados críticos ou que estivessem na FAIXA DE TRANSIÇÃO, conforme o critério já citado de SONNENBURG<sup>27</sup> cujo objetivo era facilitar a comparação visual entre os dois métodos (o do GABARITO e o dos desvios padrões).

Representam-se, nas várias situações estudadas, os desvios padrões encontrados — GRÁFICOS VI-1 a VI-10. As linhas tracejadas representam os cálculos feitos na segunda etapa, ou seja, com defasagem de 60 m ou 50 m (03 ou 2 + 10 estacas), respectivamente, para estudos de 120 m ou 100 m de pista.

Encontram-se nas TABELAS VI-8.1 a VI-8.4 as análises de variância feitas para os desvios padrões obtidos nas três linhas de nivelamento topográfico da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz e na TABELA VI-9 os valores do teste de STUDENT obtidos com os desvios padrões encontrados nas duas linhas estudadas na pista de pouso da Base Aérea de Canoas. (BRITTO<sup>34</sup>, GRANNER<sup>6</sup>, SPIEGEL<sup>28</sup>, WONNACOTT & WONNACOTT<sup>35</sup>).

TABELA VI.6 - RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS FEITAS A PARTIR DAS COTAS OBTIDAS, A CADA 120m (6 ESTACAS) DE PISTA

TABELA VI.6.1 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m Æ

ESQUERDA DO EIXO - CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO ABSOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 06	2176	2112	2132	9,90	14,62	0,68	9,17	1,67	32,50
06 a 12	2154	2121	2138	6,21	7,60	0,82	1,67	0,00	22,50
12 a 18	2166	2141	2152	4,59	5,73	0,80	5,00	0,00	13,30
18 a 24	2160	2130	2143	6,52	7,68	0,85	2,50	0,00	22,50
24 a 30	2156	2139	2146	4,09	4,66	0,88	1,67	0,00	2,50
30 a 36	2170	2140	2156	7,42	8,91	0,83	0,00	0,00	42,50
36 a 42	2168	2044	2106	38,98	43,52	0,90	0,00	0,00	90,00
42 a 48	2058	1975	2002	17,20	20,27	0,85	3,33	0,00	75,80
48 a 54	2089	1978	2030	39,78	42,34	0,94	0,00	0,00	95,80
54 a 60	2162	2073	2137	13,42	19,00	0,71	8,33	0,83	41,70
60 a 66	2184	2142	2158	9,73	11,34	0,86	1,67	0,00	50,00
66 a 72	2180	2144	2159	6,65	8,22	0,81	3,33	0,00	25,00
72 a 78	2181	2142	2165	6,78	8,20	0,83	3,33	0,00	21,70
77 a 83	2179	2110	2151	12,05	15,90	0,76	1,67	0,00	55,00
83 a 84*	2187	2140	-	3,00	3,74	0,80	5,00	0,00	0,00
84 a 86+15*	2381	2184	-	7,25	9,24	0,79	3,64	0,83	27,27
87 a 93	2391	2365	2378	4,75	6,35	0,75	0,00	0,00	0,80
91 a 97**	2420	2381	-	1,83	2,40	0,76	11,67	0,00	0,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	11,66	13,93	0,83	3,36	0,17	36,34
** IDEM DA ESTACA 95 Æ 97			PONDERADA						

## CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 03

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO $\sigma$		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
03 a 09	2149	2116	2133	7,68	9,09	0,85	0,00	0,00	41,70
09 a 15	2156	2127	2144	5,92	7,11	0,83	4,17	0,00	15,00
15 a 21	2166	2134	2149	6,95	8,34	0,83	0,83	0,00	24,20
21 a 27	2160	2130	2144	6,14	7,40	0,83	2,50	0,00	24,20
27 a 33	2159	2140	2150	4,47	5,37	0,83	0,00	0,00	4,20
33 a 39	2171	2100	2152	14,39	18,44	0,78	7,50	0,00	63,30
39 a 45	2102	1975	2038	29,28	35,13	0,83	0,00	0,00	80,00
45 a 51	2019	1975	1995	8,83	10,53	0,84	1,67	0,00	42,50
51 a 57	2154	2012	2098	33,98	38,47	0,88	3,33	0,00	91,20
57 a 63	2168	2128	2148	6,55	8,02	0,82	4,17	0,00	21,70
63 a 69	2184	2150	2165	6,99	8,16	0,86	0,00	0,00	26,70
69 a 75	2181	2142	2161	8,15	9,47	0,86	3,33	0,00	38,30
75 a 81	2179	2110	2156	11,30	14,85	0,76	5,83	0,83	44,20
77 a 83	2179	2110	2146	13,83	15,91	0,87	0,83	0,00	70,00
83 a 84*	2182	2140	-	3,00	3,74	0,80	5,00	0,00	0,00
84 a 86+15**	2381	2184	-	7,25	9,24	0,79	3,64	0,83	27,27
87 a 93	2391	2365	2378	4,75	6,35	0,75	10,00	0,00	11,70
91 a 97**	2420	2381	-	1,83	2,40	0,76	8,33	0,00	0,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS ** IDEM DA ESTACA 95 À 97			MÉDIA PONDERADA	10,52	12,63	0,83	3,31	0,07	36,78



TABELA VI.6.3 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO DO EIXO -  
CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 06	2206	2169	2181	6,09	8,22	0,74	7,50	2,50	19,20
06 a 12	2213	2172	2197	9,64	11,47	0,84	4,17	0,00	41,70
12 a 18	2213	2178	2199	7,42	8,73	0,85	3,33	0,00	28,30
18 a 24	2211	2194	2202	2,81	3,54	0,79	2,50	0,00	0,00
24 a 30	2210	2189	2199	3,34	4,21	0,79	1,67	0,00	0,80
30 a 36	2212	2192	2202	3,47	4,17	0,83	2,50	0,00	1,70
36 a 42	2196	2064	2138	40,53	45,36	0,89	0,00	0,00	90,80
42 a 48	2069	2008	2027	15,39	17,73	0,87	0,00	0,00	71,70
48 a 54	2107	2004	2052	38,41	41,65	0,92	0,00	0,00	93,30
54 a 60	2185	2100	2165	17,57	23,69	0,74	10,83	0,00	69,20
60 a 66	2216	2176	2196	11,72	12,58	0,93	0,00	0,00	75,80
66 a 72	2224	2188	2206	8,43	9,43	0,89	0,00	0,00	39,20
72 a 78	2223	2181	2207	6,19	8,27	0,75	7,50	0,00	23,30
77 a 83	2223	2181	2205	9,61	11,06	0,87	0,00	0,00	52,50
83 a 84*	2431	2203	-	3,65	5,17	0,71	5,00	0,00	5,00
84 a 86+15*	2439	2238	-	5,43	6,35	0,86	0,00	0,00	10,00
87 a 93	2448	2419	2434	4,38	6,11	0,72	0,00	0,00	12,50
91 a 97**	2468	2436	-	2,40	2,96	0,80	11,67	0,00	0,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS ** IDEM DA ESTACA 95 À 97			MÉDIA PONDERADA	11,46	13,41	0,85	3,16	0,15	37,62

TABELA VI.6.4 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO NO EIXO -

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 03

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS			
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm	
03 a 09	2213	2171	2189	13,99	15,13	0,93	0,00	0,00	80,00	
09 a 15	2210	2178	2193	4,70	6,37	0,74	5,00	0,00	19,20	
15 a 21	2213	2194	2203	3,35	4,24	0,79	4,17	0,00	0,80	
21 a 27	2211	2196	2202	3,16	3,73	0,85	3,33	0,00	0,00	
27 a 33	2212	2189	2200	4,05	5,15	0,79	1,67	0,00	3,30	
33 a 39	2206	2137	2189	12,78	17,25	0,74	6,67	0,83	72,50	
39 a 45	2136	2015	2068	27,74	33,95	0,82	0,83	0,00	77,50	
45 a 51	2038	2004	2016	4,95	6,82	0,73	4,17	2,50	14,17	
51 a 57	2175	2039	2117	33,33	39,09	0,85	0,00	0,00	92,50	
57 a 63	2206	2173	2182	3,81	5,68	0,67	3,33	0,00	5,00	
63 a 69	2224	2196	2210	4,97	6,23	0,80	3,33	0,00	14,20	
69 a 75	2216	2181	2202	7,36	8,56	0,86	0,83	0,00	18,30	
75 a 81	2223	2187	2207	7,24	9,25	0,78	1,67	0,00	31,70	
77 a 83	2223	2181	2203	9,43	11,06	0,85	0,00	0,00	52,50	
83 a 84*	2431	2203	-	3,65	5,17	0,71	5,00	0,00	5,00	
84 a 86+15*	2439	2238	-	5,43	6,35	0,86	0,00	0,00	10,00	
87 a 93	2448	2419	2434	4,38	6,11	0,72	0,00	0,00	12,50	
91 a 97**	2465	2436	-	2,40	2,96	0,80	11,67	0,00	0,00	
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	9,07	11,15	0,81	2,86	0,20	33,61	
** IDEM DA ESTACA 95 À 97			PONDERADA							

TABELA VI.6.5 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m À DIREITA DO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 06	2177	2122	2138	7,28	11,17	0,65	8,33	3,33	20,00
06 a 12	2173	2120	2147	12,57	14,53	0,87	0,00	0,00	65,00
12 a 18	2158	2134	2144	3,88	4,96	0,78	4,17	0,00	4,20
18 a 24	2153	2131	2142	3,43	4,42	0,78	6,67	0,00	4,20
24 a 30	2159	2129	2140	5,22	6,33	0,82	2,50	0,00	15,80
30 a 36	2170	2152	2159	3,25	4,06	0,80	3,33	0,00	0,80
36 a 42	2161	2030	2102	39,12	44,17	0,89	0,00	0,00	88,30
42 a 48	2050	1949	1977	20,77	25,40	0,82	9,17	0,00	77,50
48 a 54	2050	1949	1999	33,88	37,98	0,89	0,00	0,00	87,50
54 a 60	2145	2054	2103	18,85	24,47	0,77	3,33	0,00	59,20
60 a 66	2139	2101	2118	6,48	8,10	0,80	5,00	0,00	21,70
66 a 72	2152	2125	2139	5,47	6,52	0,84	0,83	0,00	14,20
72 a 78	2173	2133	2153	7,25	9,03	0,80	3,33	0,00	29,20
77 a 83	2173	2111	2141	11,74	14,42	0,81	8,33	0,00	53,30
83 a 84*	2200	2149	-	5,60	7,10	0,79	5,00	0,00	15,00
84 a 86+15*	2395	2202	-	11,14	12,78	0,87	0,00	0,00	61,82
87 a 93	2400	2370	2389	4,88	6,54	0,75	8,33	0,00	14,20
91 a 97**	2417	2382	-	3,68	4,26	0,86	0,83	0,83	0,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS ** IDEM DA ESTACA 95 À 97			MÉDIA PONDERADA	11,66	14,04	0,83	3,91	0,25	35,24

TABELA VI.6.6 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m À DIREITA DO EIXO  
CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 03

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
03 a 09	2173	2125	2145	13,11	14,45	0,91	0,00	0,00	72,50
09 a 15	2165	2120	2144	8,05	9,93	0,81	7,50	0,00	36,70
15 a 21	2153	2135	2145	2,99	3,77	0,79	5,00	0,00	1,70
21 a 27	2146	2129	2140	3,90	5,02	0,78	5,00	0,00	6,70
27 a 33	2148	2131	2151	9,13	10,68	0,85	0,00	0,00	51,70
33 a 39	2168	2105	2150	10,81	14,92	0,72	9,17	0,83	41,70
39 a 45	2107	1962	2030	33,97	41,10	0,83	0,00	0,00	78,30
45 a 51	1996	1949	1964	8,90	11,00	0,81	5,00	0,00	42,50
51 a 57	2117	1989	2060	27,45	34,24	0,80	2,50	0,00	69,20
57 a 63	2145	2101	2119	8,83	10,82	0,82	5,00	0,00	37,50
63 a 69	2152	2109	2133	10,84	12,40	0,87	0,00	0,00	57,50
69 a 75	2165	2129	2146	9,82	11,19	0,88	0,00	0,00	57,50
75 a 81	2173	2129	2150	6,24	8,37	0,75	0,12	0,00	21,70
77 a 83	2173	2111	2141	11,74	14,42	0,81	8,33	0,00	53,30
83 a 84*	2200	2149	-	5,60	7,10	0,79	5,00	0,00	15,00
84 a 86+15*	2395	2202	-	11,14	12,78	0,87	0,00	0,00	61,82
87 a 93	2400	2370	2389	4,88	6,54	0,75	8,33	0,00	14,20
91 a 97**	2417	2832	-	3,68	4,26	0,86	0,83	0,83	0,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS ** IDEM DA ESTACA 95 À 97			MÉDIA PONDERADA	10,85	13,27	0,82	3,47	0,10	40,51

## CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 06	50369	49979	*	3,12	4,05	0,77	2,50	1,67	2,50
06 a 12	50765	50374	*	5,77	6,98	0,83	4,17	0,00	17,50
15 a 21	51360	50958	*	7,05	8,79	0,80	2,50	0,00	35,00
21 a 27	51752	51363	*	5,76	7,22	0,80	1,67	0,00	22,50
27 a 33	52146	51757	*	7,23	8,19	0,88	0,00	0,00	31,70
39 a 45	52431	52404	52417	4,04	5,07	0,80	3,33	0,00	6,70
45 a 51	52434	52391	52419	8,59	10,69	0,80	6,67	0,00	30,80
51 a 57	52417	52391	52406	4,47	5,87	0,76	0,00	0,00	0,80
63+10 a 69+10	52349	52202	*	5,85	6,53	0,90	0,00	0,00	20,00
69+10 a 75+10	52201	52054	*	6,12	7,03	0,87	0,00	0,00	19,20
75+10 a 81+10	52051	51880	*	6,32	8,44	0,75	1,67	0,00	35,00
90 a 96	51738	51704	51715	5,63	7,68	0,73	6,67	0,83	17,50
96 a 102	51741	51711	51726	6,79	7,77	0,87	0,00	0,00	30,80
102 a 108	51727	51714	51722	2,56	3,15	0,81	1,67	0,00	0,00
108 a 114	51725	51708	51715	3,06	3,75	0,82	3,33	0,00	1,70
114 a 120	51742	51712	51728	5,34	6,85	0,78	4,17	0,00	19,20
122+12 a 128+12	51741	51725	51734	2,98	3,71	0,80	2,50	0,00	0,00
128+12 a 134+12	51740	51724	51734	1,72	2,27	0,76	5,00	1,67	1,70
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	5,13	6,34	0,81	2,55	0,23	16,23

TABELA VI.6.8 - (BACO-RS) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m À ESQUERDA DO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 03

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
03 a 09	50573	50171	*	5,35	6,81	0,79	4,17	0,00	20,00
09 a 15	50958	50582	*	3,94	5,07	0,78	2,50	0,83	2,50
18 a 24	51562	51154	*	7,75	9,44	0,82	2,50	0,00	43,30
24 a 30	51956	51565	*	7,45	8,49	0,88	0,00	0,00	36,70
48 a 54	52427	52391	52408	8,31	9,47	0,88	0,83	0,00	30,00
52+10 a 58+10	52416	52400	52410	3,07	3,88	0,79	5,00	0,00	0,80
66 a 72	52297	52129	*	4,52	5,54	0,82	1,67	0,00	11,70
72 a 78	52132	51988	*	6,08	7,73	0,79	0,00	0,00	25,00
78 a 84	51986	51809	*	9,02	10,82	0,83	2,50	0,00	47,50
93 a 99	51741	51706	51724	9,27	10,24	0,91	0,00	0,00	52,50
99 a 105	51729	51711	51721	3,99	4,63	0,86	1,67	0,00	1,70
105 a 111	51725	51709	51718	4,08	4,68	0,87	0,00	0,00	0,00
111 a 117	51732	51708	51719	5,22	6,17	0,85	1,67	0,00	7,50
116+12 a 122+12	51742	51724	51732	3,68	4,38	0,84	2,50	0,00	0,80
125+12 a 131+12	51741	51731	51735	1,98	2,62	0,76	4,17	0,83	0,80
131+10 a 137+10	51741	51729	51735	2,07	2,44	0,85	4,17	0,00	0,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	5,36	6,40	0,84	2,08	0,10	17,55

## CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 06	50391	50002	*	4,61	5,80	0,79	6,67	0,00	11,70
06 a 12	50796	50397	*	5,84	8,15	0,72	6,67	0,00	20,00
15 a 21	51384	50983	*	6,16	7,39	0,83	4,17	0,00	18,30
21 a 27	51761	51389	*	7,98	10,56	0,76	7,50	0,00	30,00
27 a 33	52176	51762	*	7,33	9,32	0,79	5,83	0,00	26,70
39 a 45	52459	52440	52449	3,69	4,34	0,85	3,33	0,00	0,80
45 a 51	52452	52421	52438	5,19	6,47	0,80	7,50	0,00	12,50
51 a 57	52450	52415	52429	6,98	8,51	0,82	1,67	0,00	30,00
63+10 a 69+10	52382	52220	*	4,20	5,15	0,82	1,67	0,00	5,00
69+10 a 75+10	52217	52076	*	6,57	8,21	0,80	2,50	0,00	25,00
75+10 a 81+10	52078	51907	*	5,97	7,10	0,84	0,83	0,00	16,70
90 a 96	51750	51729	51740	5,60	6,38	0,88	0,00	0,00	13,30
96 a 102	51758	51737	51748	3,51	4,45	0,79	4,17	0,00	2,50
102 a 108	51768	51745	51756	4,12	5,11	0,81	3,33	0,00	9,20
108 a 114	51766	51734	51750	5,15	6,62	0,78	4,17	0,00	17,50
114 a 120	51770	51735	51760	6,45	8,45	0,76	8,33	0,00	17,50
122+12 a 128+12	51776	51757	51766	4,20	5,12	0,82	0,00	0,00	3,30
128+12 a 134+12	51781	51756	51766	3,24	4,39	0,74	7,50	0,83	6,70
*AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	5,38	6,75	0,80	4,21	0,05	14,82

## CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 03

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
03 a 09	50594	50202	*	7,32	9,29	0,79	4,17	0,00	31,70
09 a 15	50977	50599	*	2,82	3,78	0,75	5,00	0,00	0,00
18 a 24	51582	51192	*	8,20	9,42	0,87	1,67	0,00	33,30
24 a 30	51973	51583	*	7,02	9,93	0,71	12,50	0,00	22,50
48 a 54	52450	52420	52436	5,18	6,39	0,81	5,00	0,00	13,30
52+10 a 58+10	52442	52413	52429	6,59	7,87	0,84	0,00	0,00	31,70
66 a 72	52324	52153	*	6,65	8,11	0,82	2,50	0,00	25,00
72 a 78	52154	52010	*	6,09	6,94	0,88	3,33	0,00	13,30
78 a 84	52007	52834	*	4,75	6,14	0,77	5,00	0,00	12,50
93 a 99	51758	51734	51748	3,86	4,96	0,78	7,50	0,00	7,50
99 a 105	51762	51739	51750	4,42	5,56	0,79	1,67	0,00	11,70
105 a 111	51768	51739	51755	5,24	6,29	0,83	4,17	0,00	10,80
111 a 117	51770	51734	51753	8,63	10,05	0,86	0,00	0,00	49,20
116+12 a 122+12	51773	51751	51761	3,92	4,74	0,83	5,00	0,00	5,00
125+12 a 131+12	51775	51756	51768	3,20	4,02	0,80	1,67	0,83	1,70
131+10 a 137+10	51783	51757	51770	4,75	5,79	0,82	2,50	0,00	8,30
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	5,54	6,83	0,81	3,86	0,05	17,34



## CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 05	2176	2112	2133	10,46	15,45	0,68	9,00	0,00	38,00
05 a 10	2150	2119	2134	8,55	9,61	0,89	0,00	0,00	52,00
10 a 15	2156	2135	2145	5,17	6,03	0,86	0,00	0,00	10,00
15 a 20	2166	2134	2150	6,17	8,08	0,76	0,00	0,00	25,00
20 a 25	2160	2130	2143	6,62	7,84	0,84	0,00	0,00	24,00
25 a 30	2156	2139	2146	4,34	4,90	0,89	3,00	0,00	3,00
30 a 35	2171	2140	2154	6,75	8,38	0,81	1,00	0,00	32,00
35 a 40	1168	2074	2138	28,10	31,35	0,90	3,00	0,00	93,00
40 a 45	2074	1975	2029	25,53	29,54	0,86	0,00	0,00	81,00
45 a 50	2019	1975	1992	8,62	11,00	0,78	5,00	0,00	40,00
50 a 55	2141	1988	2060	30,39	36,73	0,83	2,00	0,00	90,00
55 a 60	2162	2128	2145	6,08	7,64	0,80	3,00	0,00	24,00
60 a 65	2184	2142	2156	9,05	10,89	0,83	4,00	0,00	47,00
65 a 70	2180	2151	2164	6,28	7,43	0,85	3,00	0,00	24,00
70 a 75	2181	2142	2159	8,24	9,75	0,85	3,00	0,00	39,00
75 a 80	2179	2136	2162	6,82	8,53	0,74	3,00	1,00	28,00
78 a 83	2164	2110	2148	12,52	14,62	0,86	0,00	0,00	67,00
87 a 92	2391	2365	2376	5,02	6,91	0,73	0,00	0,00	13,00
92 a 97*	2420	2381	-	1,81	2,39	0,76	8,00	0,00	0,00
* AJUSTE FEITO COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS DA ESTACA 95 À 97			MÉDIA	10,34	12,48	0,83	2,47	0,05	38,42

TABELA VI.7.2 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m À ESQUERDA DO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 02+10

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRAO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
02+10 a 07+10	2146	2112	2127	6,22	7,65	0,81	7,00	0,00	20,00
07+10 a 12+10	2156	2127	2142	5,29	6,45	0,82	8,00	0,00	10,00
12+10 a 17+10	2165	2140	2153	4,75	6,06	0,78	2,00	0,00	14,00
17+10 a 22+10	2156	2132	2145	5,44	6,89	0,79	3,00	0,00	24,00
22+10 a 27+10	2160	2130	2144	5,88	6,87	0,86	1,00	0,00	19,00
27+10 a 32+10	2158	2140	2149	4,47	5,31	0,84	0,00	0,00	0,00
32+10 a 37+10	2171	2141	2160	5,93	7,52	0,79	5,00	0,00	16,00
37+10 a 42+10	2159	2030	2083	30,08	34,95	0,86	4,00	0,00	87,00
42+10 a 47+10	2034	1975	1998	15,71	17,93	0,88	5,00	0,00	78,00
47+10 a 52+10	2087	1978	2013	24,84	30,97	0,80	7,00	0,00	86,00
52+10 a 57+10	2154	2065	2114	29,87	31,36	0,95	0,00	0,00	85,00
57+10 a 62+10	2160	2128	2148	5,90	7,25	0,81	7,00	0,00	18,00
62+10 a 67+10	2184	2150	2167	6,85	8,20	0,84	1,00	0,00	27,00
67+10 a 72+10	2171	2142	2157	5,94	7,25	0,82	1,00	0,00	23,00
72+10 a 77+10	2181	2154	2166	5,94	6,76	0,88	3,00	0,00	14,00
77+10 a 82+10	2173	2110	2144	13,27	14,63	0,91	2,00	0,00	70,00
89+06 a 94+06	2391	2381	2384	1,67	2,54	0,66	6,00	0,00	0,00
			MÉDIA	10,47	12,27	0,83	3,65	0,00	34,76

## CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 05	2206	2169	2181	6,61	8,78	0,75	6,00	0,00	22,00
05 a 10	2213	2174	2195	13,19	14,50	0,91	0,00	0,00	78,00
10 a 15	2204	2178	2192	4,45	6,00	0,74	4,00	0,00	16,00
15 a 20	2213	2195	2203	3,76	4,61	0,82	1,00	0,00	1,00
20 a 25	2211	2196	2203	2,60	3,28	0,79	6,00	0,00	1,00
25 a 30	2207	2192	2198	3,11	3,92	0,79	5,00	0,00	0,00
30 a 35	2212	2192	2203	3,42	4,11	0,83	4,00	0,00	2,00
35 a 40	2203	2114	2173	24,92	28,69	0,87	5,00	0,00	92,00
40 a 45	2110	2015	2057	20,56	25,35	0,81	2,00	0,00	67,00
45 a 50	2021	2004	2014	3,44	4,20	0,82	3,00	0,00	0,00
50 a 55	2140	2019	2080	29,85	34,12	0,88	0,00	0,00	91,00
55 a 60	2185	2142	2174	7,83	9,92	0,79	8,00	1,00	24,00
60 a 65	2216	2176	2193	11,04	12,31	0,90	0,00	0,00	59,00
65 a 70	2224	2196	2210	5,03	6,30	0,80	4,00	0,00	13,00
70 a 75	2215	2186	2200	7,19	8,45	0,85	1,00	0,00	37,00
75 a 80	2223	2189	2210	5,14	6,65	0,77	4,00	2,00	12,00
78 a 83	2221	2181	2204	9,19	10,27	0,90	0,00	0,00	53,00
87 a 92	2448	2419	2432	8,97	9,86	0,91	0,00	0,00	15,00
92 a 97*	2468	2436	-	2,28	3,02	0,76	2,00	0,00	0,00
* AJUSTE FEITO COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS DA ESTACA 95 À 97.			MÉDIA	9,08	10,75	0,84	2,89	0,16	30,68

TABELA VI.7.4 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO NO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 02+10

ESTACAS			COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
			MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
02+10	a	07+10	2213	2169	2180	5,85	9,62	0,61	8,00	5,00	18,00
07+10	a	12+10	2213	2187	2200	7,41	8,20	0,90	0,00	0,00	38,00
12+10	a	17+10	2213	2179	2198	8,20	9,21	0,89	3,00	0,00	46,00
17+10	a	22+10	2210	2194	2202	3,02	3,77	0,80	3,00	0,00	1,00
22+10	a	27+10	2210	2196	2201	3,24	3,97	0,82	5,00	1,00	4,00
27+10	a	32+10	2210	2191	2198	3,65	4,66	0,78	3,00	0,00	9,00
32+10	a	37+10	2212	2185	2198	6,06	7,14	0,85	0,00	0,00	30,00
37+10	a	42+10	2188	2051	2133	39,51	40,93	0,97	1,00	0,00	88,00
42+10	a	47+10	2060	2008	2025	13,51	16,22	0,83	5,00	0,00	70,00
47+10	a	52+10	2098	2004	2032	21,95	27,34	0,80	7,00	0,00	83,00
52+10	a	57+10	2182	2097	2136	30,29	32,12	0,94	0,00	0,00	95,00
57+10	a	62+10	2191	2173	2181	3,02	3,70	0,82	6,00	0,00	2,00
62+10	a	67+10	2224	2191	2206	5,42	6,96	0,78	9,00	0,00	24,00
67+10	a	72+10	2220	2186	2203	8,95	10,05	0,89	0,00	0,00	52,00
72+10	a	77+10	2217	2181	2208	4,70	6,33	0,74	5,00	3,00	12,00
77+10	a	82+10	2223	2186	2202	9,79	11,34	0,86	0,00	0,00	64,00
89+06	a	94+06	2448	2436	2440	1,93	2,70	0,72	6,00	0,00	0,00
					MÉDIA	10,38	12,02	0,85	3,59	0,53	37,41

TABELA VI.7.5 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m À DIREITA DO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 05	2177	2122	2139	8,00	11,86	0,67	9,00	3,00	22,00
05 a 10	2173	2127	2151	12,47	13,79	0,90	0,00	0,00	73,00
10 a 15	2158	2120	2141	7,28	8,83	0,82	4,00	0,00	31,00
15 a 20	2153	2135	2144	3,32	4,05	0,82	3,00	0,00	0,00
20 a 25	2148	2129	2140	3,67	4,71	0,78	6,00	0,00	6,00
25 a 30	2154	2131	2141	5,27	6,07	0,87	1,00	0,00	12,00
30 a 35	2168	2152	2159	3,60	4,36	0,83	4,00	0,00	1,00
35 a 40	2161	2080	2135	22,61	25,76	0,88	3,00	0,00	93,00
40 a 45	2078	1962	2018	28,65	32,75	0,87	0,00	0,00	96,00
45 a 50	1975	1949	1958	6,50	7,74	0,84	2,00	0,00	23,00
50 a 55	2076	1972	2027	28,65	31,53	0,91	0,00	0,00	93,00
55 a 60	2145	2084	2112	12,84	15,67	0,82	1,00	0,00	62,00
60 a 65	2134	2101	2116	5,39	6,97	0,77	10,00	0,00	17,00
65 a 70	2151	2122	2139	6,27	7,65	0,82	3,00	0,00	23,00
70 a 75	2165	2129	2147	10,11	11,36	0,89	0,00	0,00	64,00
75 a 80	2173	2137	2151	5,77	7,59	0,76	6,00	0,00	24,00
78 a 83	2164	2111	2144	10,59	12,13	0,87	7,00	0,00	44,00
87 a 92	2400	2370	2387	5,88	7,02	0,84	6,00	0,00	10,00
92 a 97*	2417	2382	2391	3,85	4,52	0,85	1,00	0,00	1,00
* AJUSTE FEITO COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS DA ESTACA 95 À 97			MÉDIA	10,04	11,81	0,85	3,47	0,16	36,58

TABELA VI.7.6 - (BASC-RJ) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m À DIREITA DO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 02+10

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
02+10 a 07+10	2167	2125	2137	5,07	7,89	0,64	4,00	0,00	15,00
07+10 a 12+10	2173	2120	2150	13,38	15,12	0,88	0,00	0,00	72,00
12+10 a 17+10	2153	2135	2144	3,27	4,09	0,80	3,00	0,00	0,00
17+10 a 22+10	2153	2131	2143	3,42	4,45	0,77	6,00	0,00	4,00
22+10 a 27+10	2153	2135	2140	4,13	5,22	0,79	6,00	0,00	8,00
27+10 a 32+10	2166	2135	2149	8,52	9,72	0,88	0,00	0,00	44,00
32+10 a 37+10	2170	2147	2158	4,31	5,32	0,81	2,00	0,00	7,00
37+10 a 42+10	2150	2030	2081	34,39	39,14	0,88	0,00	0,00	86,00
42+10 a 47+10	2028	1951	1975	16,33	19,32	0,85	2,00	0,00	78,00
47+10 a 52+10	2051	1942	1979	21,85	26,88	0,81	7,00	0,00	81,00
52+10 a 57+10	2117	2048	2078	23,10	24,53	0,94	0,00	0,00	95,00
57+10 a 62+10	2145	2101	2119	9,17	11,31	0,81	3,00	0,00	42,00
62+10 a 67+10	2152	2109	2126	9,78	16,11	0,61	0,00	0,00	51,00
67+10 a 72+10	2150	2129	2140	5,13	5,92	0,87	0,00	0,00	9,00
72+10 a 77+10	2164	2133	2153	6,07	7,66	0,79	6,00	0,00	20,00
77+10 a 82+10	2173	2111	2140	11,91	14,91	0,80	3,00	0,00	51,00
89+06 a 94+06	2400	2382	2390	3,62	4,38	0,83	6,00	0,00	1,00
			MÉDIA	10,79	13,06	0,83	2,82	0,00	39,06

TABELA VI.7.7 - (BACO-RS) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m À ESQUERDA DO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 05	50309	49979	*	3,26	4,23	0,77	3,00	2,00	3,00
05 a 10	50641	50313	*	5,58	7,04	0,79	3,00	0,00	21,00
10 a 15	50958	50644	*	4,17	5,29	0,79	3,00	1,00	3,00
15 a 20	51300	50964	*	6,18	8,10	0,76	6,00	0,00	26,00
20 a 25	51631	51303	*	7,43	8,85	0,84	0,00	0,00	42,00
25 a 30	51956	51631	*	7,17	8,20	0,87	0,00	0,00	33,00
39 a 44	52431	52404	52418	4,19	5,04	0,83	1,00	0,00	4,00
44 a 49	52434	52406	52422	6,17	6,82	0,90	2,00	0,00	8,00
49 a 54	52421	52391	52405	7,05	8,15	0,87	0,00	0,00	33,00
63+10 a 68+10	52349	52229	*	5,54	6,86	0,81	0,00	0,00	24,00
68+10 a 73+10	52228	52090	*	5,34	6,30	0,85	0,00	0,00	17,00
73+10 a 78+10	52089	51971	*	7,38	7,96	0,93	0,00	0,00	27,00
78+10 a 83+10	51971	51821	*	8,66	9,99	0,87	1,00	0,00	47,00
90 a 95	51715	51704	51712	1,77	2,36	0,75	10,00	0,00	0,00
95 a 100	51741	51720	51730	3,56	4,85	0,73	5,00	0,00	5,00
100 a 105	51727	51711	51720	3,75	4,29	0,87	2,00	0,00	0,00
105 a 110	51725	51709	51718	3,87	4,44	0,87	3,00	0,00	0,00
110 a 115	51725	51708	51715	3,08	3,78	0,81	4,00	0,00	2,00
115 a 120	51742	51720	51731	3,90	4,76	0,82	2,00	0,00	2,00
125 a 130	51741	51731	51736	1,79	2,19	0,82	5,00	0,00	0,00
130 a 135	51740	51724	51734	1,95	2,52	0,77	2,00	0,00	1,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	4,85	5,81	0,83	2,48	0,14	14,19

TABELA VI,7.8 - (BACO-RS) - LINHA DE NIVELAMENTO A 4,20m À ESQUERDA DO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 02+10

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
02+10 a 07+10	50482	50149	*	3,68	4,85	0,76	6,00	1,00	6,00
07+10 a 12+10	50808	50484	*	5,95	7,15	0,83	2,00	0,00	19,00
17+10 a 22+10	51452	51124	*	6,80	8,85	0,77	3,00	0,00	36,00
22+10 a 27+10	51791	51460	*	7,05	8,23	0,86	0,00	0,00	28,00
27+10 a 32+10	52114	51795	*	7,53	8,48	0,89	0,00	0,00	37,00
41+10 a 46+10	52431	52409	52418	5,49	6,62	0,83	0,00	0,00	21,00
46+10 a 51+10	52434	52391	52414	10,18	12,22	0,83	0,00	0,00	61,00
51+10 a 56+10	52417	52396	52407	4,21	4,87	0,86	4,00	0,00	3,00
67+10 a 72+10	52249	52120	*	4,71	5,78	0,81	2,00	0,00	14,00
72+10 a 77+10	52118	52998	*	7,77	8,26	0,94	0,00	0,00	30,00
77+10 a 82+10	51996	51849	*	6,82	8,14	0,84	2,00	0,00	27,00
92+10 a 97+10	51738	51706	51721	9,52	9,99	0,95	0,00	0,00	43,00
97+10 a 102+10	51741	51711	51724	6,54	7,65	0,85	4,00	0,00	18,00
102+10 a 107+10	51727	51716	51722	2,61	3,08	0,85	0,00	0,00	0,00
107+10 a 112+10	51722	51709	51715	2,84	3,46	0,82	5,00	0,00	0,00
112+10 a 117+10	51732	51708	51722	5,77	6,62	0,87	1,00	0,00	14,00
117+10 a 122+10	51742	51724	51733	3,87	4,44	0,87	3,00	0,00	0,00
122+10 a 127+10	51741	51725	51734	2,99	3,71	0,81	3,00	0,00	0,00
127+10 a 132+10	51741	51724	51734	2,14	2,86	0,75	5,00	1,00	1,00
132+10 a 137+10	51741	51731	51735	1,91	2,24	0,85	3,00	0,00	0,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	5,42	6,38	0,84	2,15	0,10	17,90



TABELA VI.7.9 - (BACO-RS) - LINHA DE NIVELAMENTO NO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 00

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
00 a 05	50341	50002	*	4,23	5,34	0,79	6,00	0,00	9,00
05 a 10	50657	50346	*	6,79	<u>9,21</u>	0,74	6,00	0,00	<u>29,00</u>
10 a 15	50977	50660	*	2,84	<u>3,81</u>	0,75	5,00	0,00	<u>0,00</u>
15 a 20	51329	50983	*	5,67	6,98	0,81	7,00	0,00	15,00
20 a 25	51644	51331	*	7,23	8,61	0,84	3,00	0,00	26,00
25 a 30	51973	51647	*	7,75	<u>10,74</u>	0,72	10,00	0,00	27,00
39 a 44	52459	52440	52448	3,27	<u>3,95</u>	0,83	5,00	0,00	9,00
44 a 49	52458	52420	52441	7,79	<u>9,41</u>	0,83	2,00	0,00	<u>35,00</u>
49 a 54	52450	52422	52436	4,69	<u>5,83</u>	0,80	7,00	0,00	9,00
63+10 a 68+10	52382	52250	*	4,37	5,34	0,82	2,00	0,00	5,00
68+10 a 73+10	52249	52122	*	7,16	8,56	0,84	1,00	0,00	28,00
73+10 a 78+10	52120	51991	*	6,23	7,15	0,87	1,00	0,00	26,00
78+10 a 83+10	51989	51853	*	3,89	4,86	0,80	5,00	0,00	5,00
90 a 95	51750	51729	51738	5,48	6,14	0,89	0,00	0,00	4,00
.95 a 100	51758	51737	51749	3,02	3,84	0,79	7,00	0,00	2,00
100 a 105	51762	51739	51750	4,98	6,02	0,83	0,00	0,00	15,00
105 a 110	51768	51740	51757	3,45	4,56	0,76	3,00	0,00	3,00
110 a 115	51758	51734	51746	4,56	5,77	0,79	3,00	0,00	14,00
115 a 120	51773	51756	51764	2,60	3,45	0,75	3,00	0,00	0,00
125 a 130	51781	51764	51769	2,99	3,36	0,89	4,00	3,00	3,00
130 a 135	55778	51757	51765	3,39	4,48	0,76	7,00	0,00	5,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	4,88	6,07	0,80	4,14	0,14	12,81

TABELA VI.7.10 - (BACO-RS) - LINHA DE NIVELAMENTO NO EIXO

CÁLCULOS A PARTIR DA ESTACA 02+10

ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIOS EM mm		RELAÇÃO $\frac{\Delta}{\sigma}$	% DE DESVIOS ABSOLUTOS		
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	MÉDIO AB- SOLUTO ( $\Delta$ )	PADRÃO ( $\sigma$ )		>2 $\sigma$	>3 $\sigma$	>10mm
02+10 a 07+10	50508	50167	*	6,80	8,74	0,78	5,00	0,00	29,00
07+10 a 12+10	50825	50511	*	4,44	6,31	0,70	8,00	1,00	9,00
17+10 a 22+10	50483	51152	*	8,43	9,74	0,87	0,00	0,00	33,00
22+10 a 27+10	51803	51486	*	6,79	10,82	0,63	10,00	0,00	30,00
27+10 a 32+10	52153	51808	*	5,98	7,58	0,79	5,00	1,00	17,00
41+10 a 46+10	52459	52427	52447	5,60	7,27	0,77	4,00	0,00	19,00
46+10 a 51+10	52452	52420	52437	5,04	6,39	0,79	7,00	0,00	13,00
51+10 a 56+10	52450	52413	52428	7,06	8,74	0,81	3,00	0,00	32,00
67+10 a 72+10	52273	52142	*	6,98	8,41	0,83	3,00	0,00	28,00
72+10 a 77+10	52139	52022	*	5,92	6,87	0,86	4,00	0,00	14,00
77+10 a 82+10	52022	51881	*	4,25	5,18	0,82	1,00	0,00	7,00
92+10 a 97+10	51757	51734	51745	3,24	4,30	0,75	6,00	0,00	4,00
97+10 a 102+10	51758	51739	51749	3,23	6,08	0,53	0,00	0,00	1,00
102+10 a 107+10	51768	51745	51756	4,02	5,12	0,79	3,00	0,00	11,00
107+10 a 112+10	51766	51739	51752	5,20	6,31	0,82	3,00	0,00	14,00
112+10 a 117+10	51770	51734	51755	9,86	11,03	0,89	0,00	0,00	56,00
117+10 a 122+10	51773	51751	51761	4,00	7,32	0,55	0,00	0,00	5,00
122+10 a 127+10	51774	51756	51765	3,93	4,76	0,83	0,00	0,00	0,00
127+10 a 132+10	51781	51757	51766	3,56	4,45	0,80	9,00	3,00	5,00
132+10 a 137+10	51783	51759	51771	4,15	5,11	0,81	3,00	0,00	6,00
* AJUSTE COM RETA DE MÍNIMOS QUADRADOS			MÉDIA	5,42	7,03	0,77	3,70	0,25	16,65

TABELA VI.8 - (BASC-RJ) - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA OS DESVIOS PADRÕES  
OBTIDOS NAS TRÊS LINHAS DE NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO

TABELA VI.8.1 - DE 6 EM 6 ESTACAS (120m) A PARTIR DA ESTACA 00

FONTE DE VARIACÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	DESVIO	VALORES DE F
TOTAL	50	7184,38	-	-	-
LINHAS ESTUDADAS	2	5,83	2,92	1,71	0,02
RESÍDUO	48	7178,55	149,55	12,23	-

TABELA VI.8.2 - DE 6 EM 6 ESTACAS (120m) A PARTIR DA ESTACA 03

FONTE DE VARIACÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	DESVIO	VALORES DE F
TOTAL	50	4910,69	-	-	-
LINHAS ESTUDADAS	2	42,51	21,26	4,61	0,21
RESÍDUO	48	4868,18	101,42	10,07	-

TABELA VI.8.3 - DE 5 EM 5 ESTACAS (100m) A PARTIR DA ESTACA 00

FONTE DE VARIACÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	DESVIO	VALORES DE F
TOTAL	59	4606,29	-	-	-
LINHAS ESTUDADAS	2	40,44	20,22	4,26	0,25
RESÍDUO	57	4565,85	80,10	8,98	-

TABELA VI.8.4 - DE 5 EM 5 ESTACAS (100m) A PARTIR DA ESTACA 02+10

FONTE DE VARIACÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADO MÉDIO	DESVIO	VALORES DE F
TOTAL	50	5166,60	-	-	-
LINHAS ESTUDADAS	2	7,23	3,62	1,90	0,03
RESÍDUO	48	5159,37	107,49	10,37	-

TABELA VI.9 - (BACO - RS) - TESTE DE *STUDENT* PARA OS DESVIOS PADRÕES OBTIDOS NAS  
DUAS LINHAS DE NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO ESTUDADAS  
NA PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE CANOAS

SITUAÇÕES ESTUDADAS	GRAUS DE LIBERDADE	VALORES CALCULADOS DE t	VALORES TABELADOS DE t	
			PROBABILIDA DE de 5 %	PROBABILIDA DE de 1 %
DESVIOS PADRÕES A CADA 120 m , A PAR TIR DA ESTACA 00	17	0,80	2,11	2,90
DESVIOS PADRÕES A CADA 120 m , A PAR TIR DA ESTACA 03	15	0,61	2,13	2,95
DESVIOS PADRÕES A CADA 100 m , A PAR TIR DA ESTACA 00	20	0,55	2,09	2,84
DESVIOS PADRÕES A CADA 100 m , A PAR TIR DA ESTACA 02 + 10	19	0,97	2,09	2,86

mm  
Desvio  
Padrão

GRÁFICO VI-1 BASC. — L. ESQUERDO  
DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 06 EM 06 ESTACAS.

Esc. { V: 1 cm = 2 mm  
H: 1:20.000

CAB 22 0 6 12 18 24 25 30 36 42 48 50 54 60 66 72 75 78 83 86 89 93 97 100 ESTACAS CAB 04 Kms

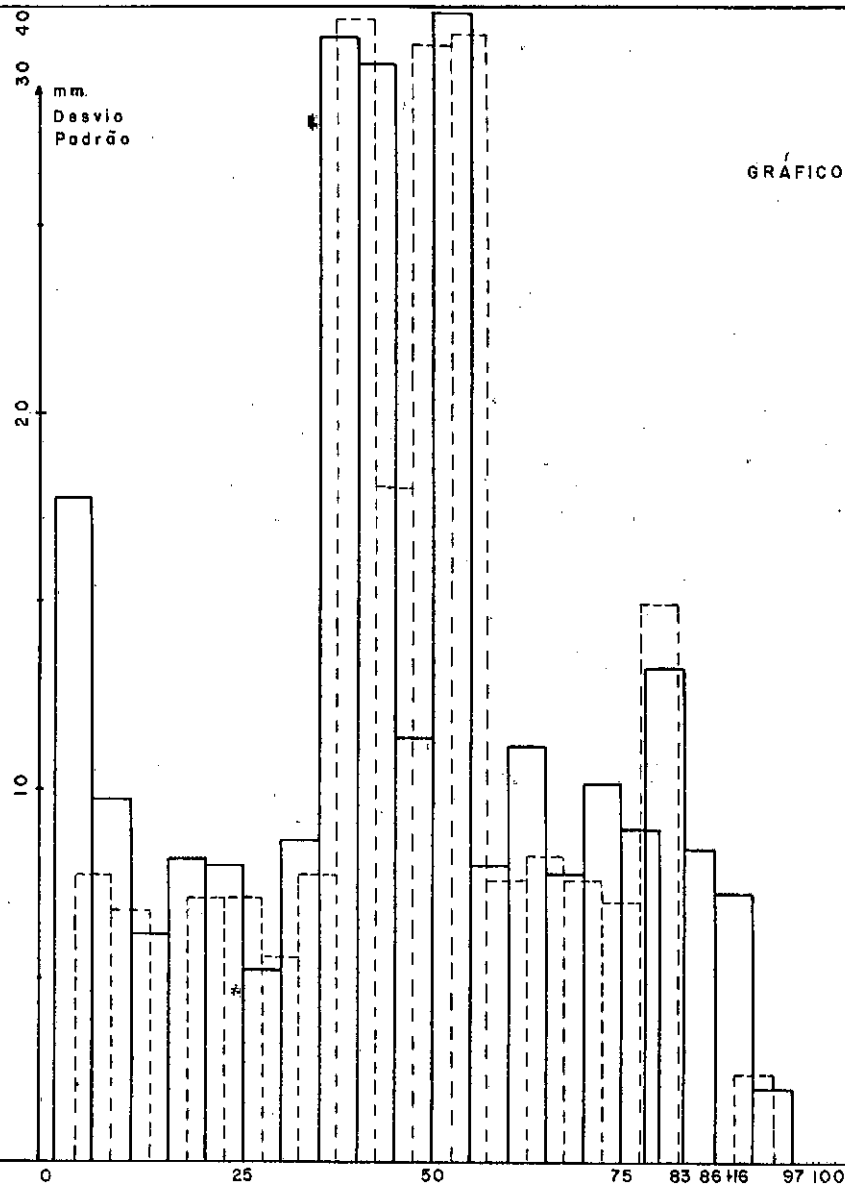
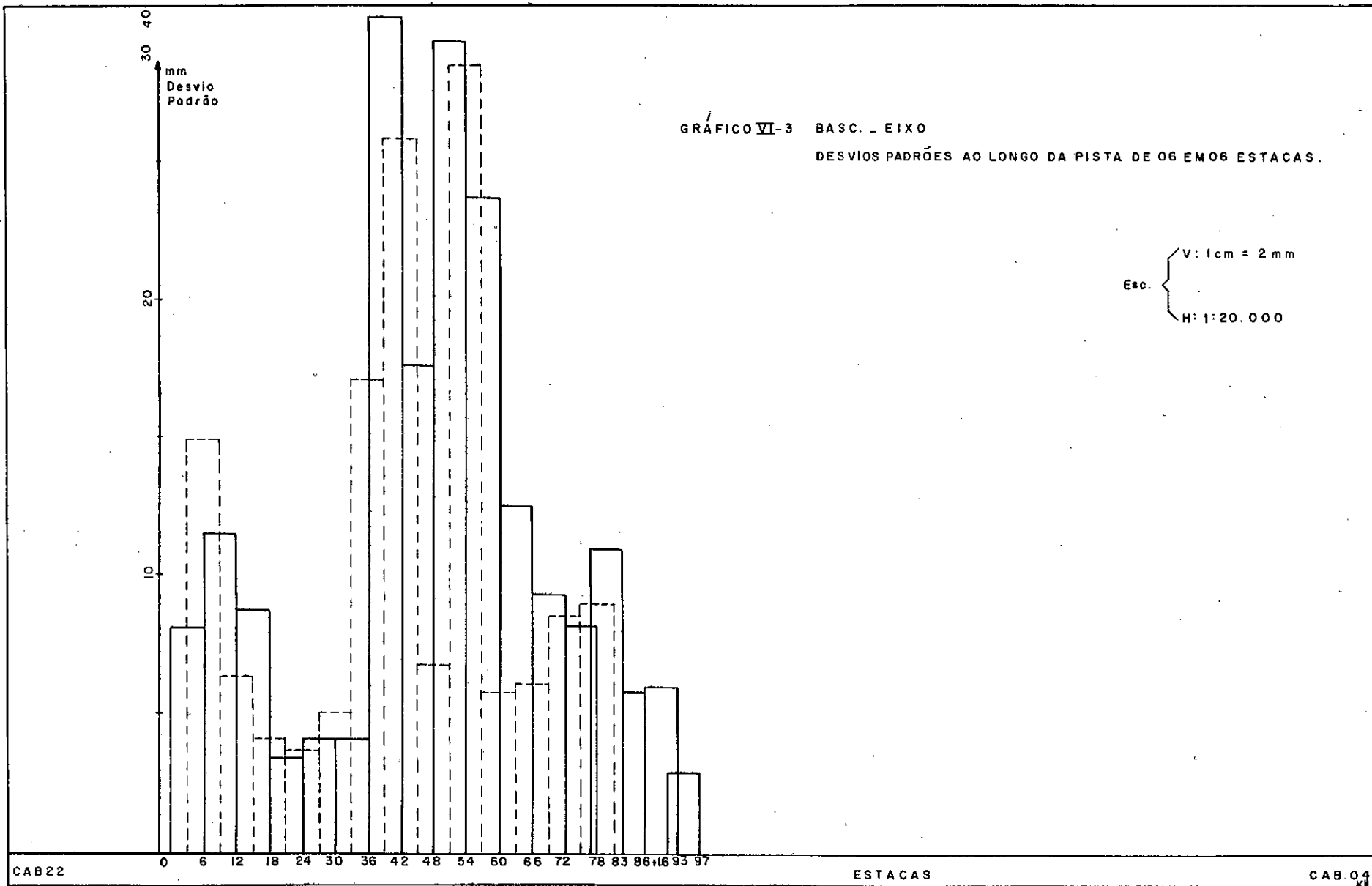


GRÁFICO VI-2 BASC. L. ESQUERDO

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 05 EM 05 ESTACAS.

Esc. { V: 1cm = 2mm  
H: 1:20.000



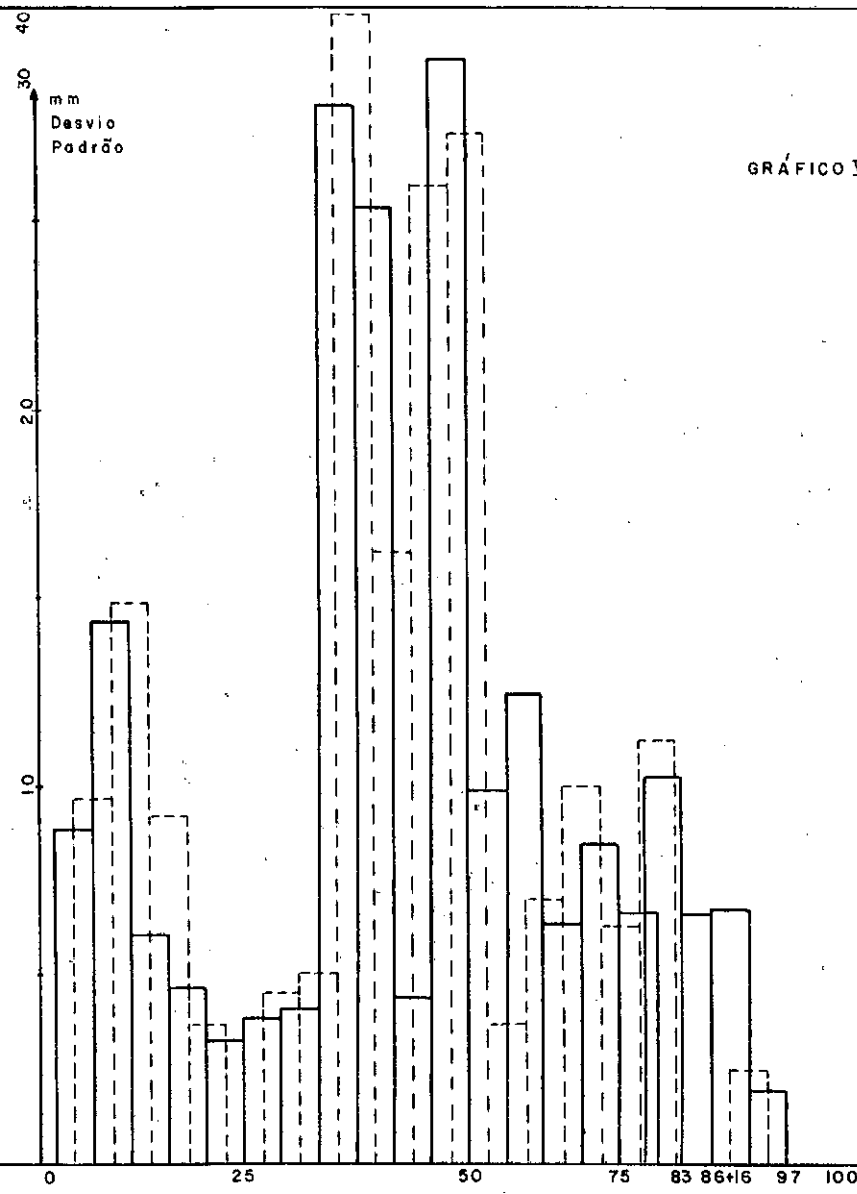


GRÁFICO VI-4 BASC. - EIXO  
 DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 05 EM 05 ESTACAS.

Esc. { V: 1 cm = 2 mm  
 H: 1:20.000



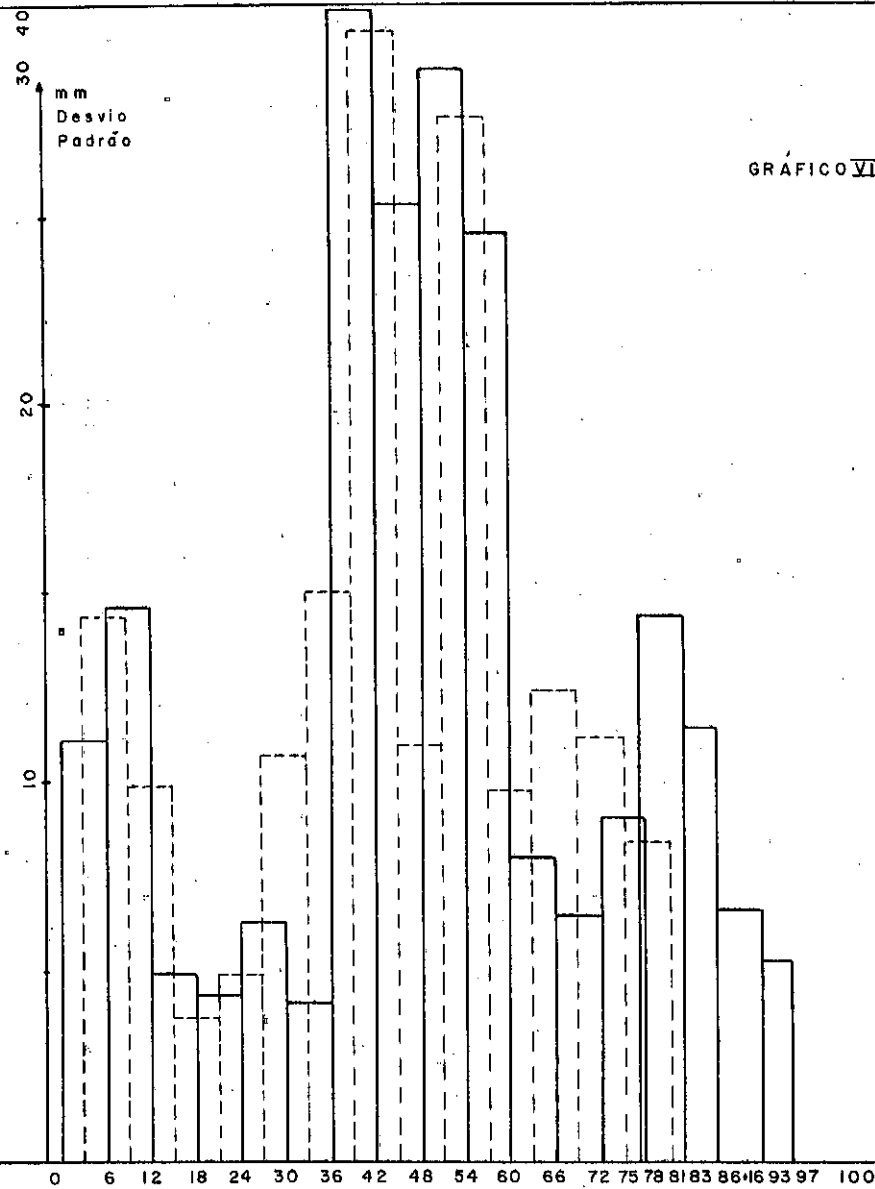


GRÁFICO VI-5 BASC. L. DIREITO

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 06 EM 06 ESTACAS.

Esc. { V: 1 cm = 2 mm  
H: 1:20.00-0

CAB 22

ESTACAS

CAB 04

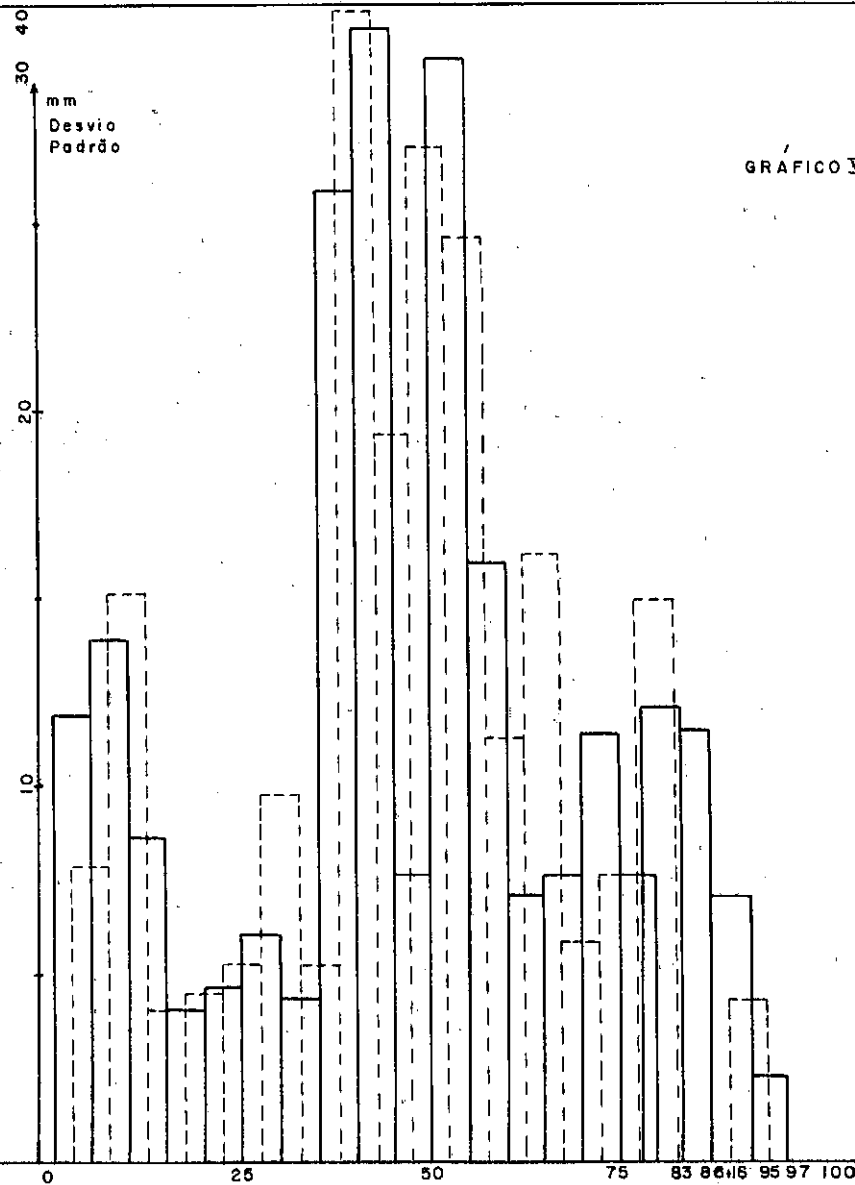


GRÁFICO VI-6 BASC. L. DIREITO

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 05 EM 05 ESTACAS.

Esc. { V: 1cm = 2mm  
H: 1:20.000

20  
15  
10  
5  
0  
mm  
Desvio  
Padrão

GRÁFICO VI-7 BACO RS. LADO ESQUERDO

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 06 EM 06 ESTACAS.

Esc. { V: 1cm = 2mm  
H: 1:20.000

CAB 12 0. 3. 6. 9. 12. 18. 21. 24. 27. 30. 33. 39. 45. 48. 51. 54. 57. 69. 70. 72. 75. 78. 81. 84. 90. 93. 96. 99. 108. 114. 120. 122. 124. 134. 142

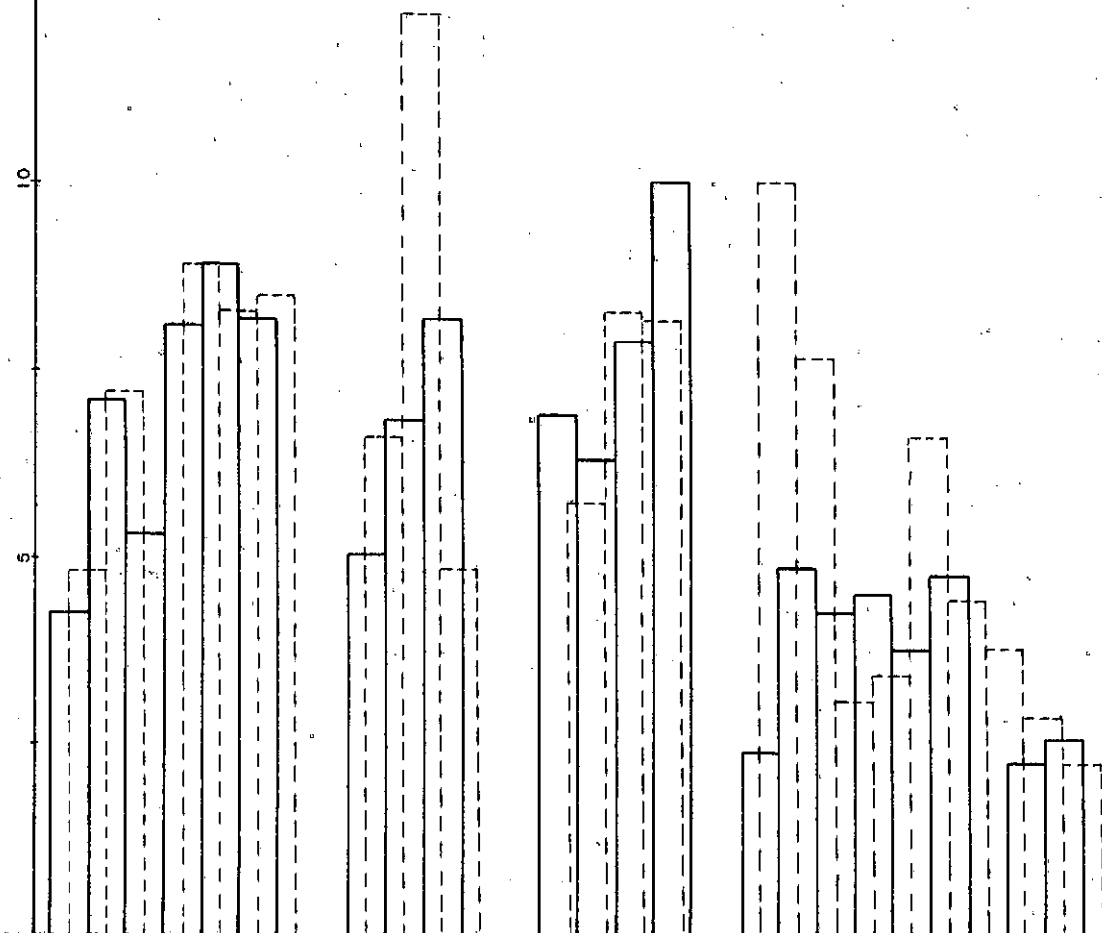
CA B 30

K114

20  
15  
10  
5  
0  
mm  
Desvio  
Padrão

GRÁFICO VI-8 BACO RS. - L. ESQUERDO  
DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 05 EM 05 ESTACAS.

Eso. {  
V: 1 cm = 2 mm  
H: 1:20.000



CAB 12

ESTACAS

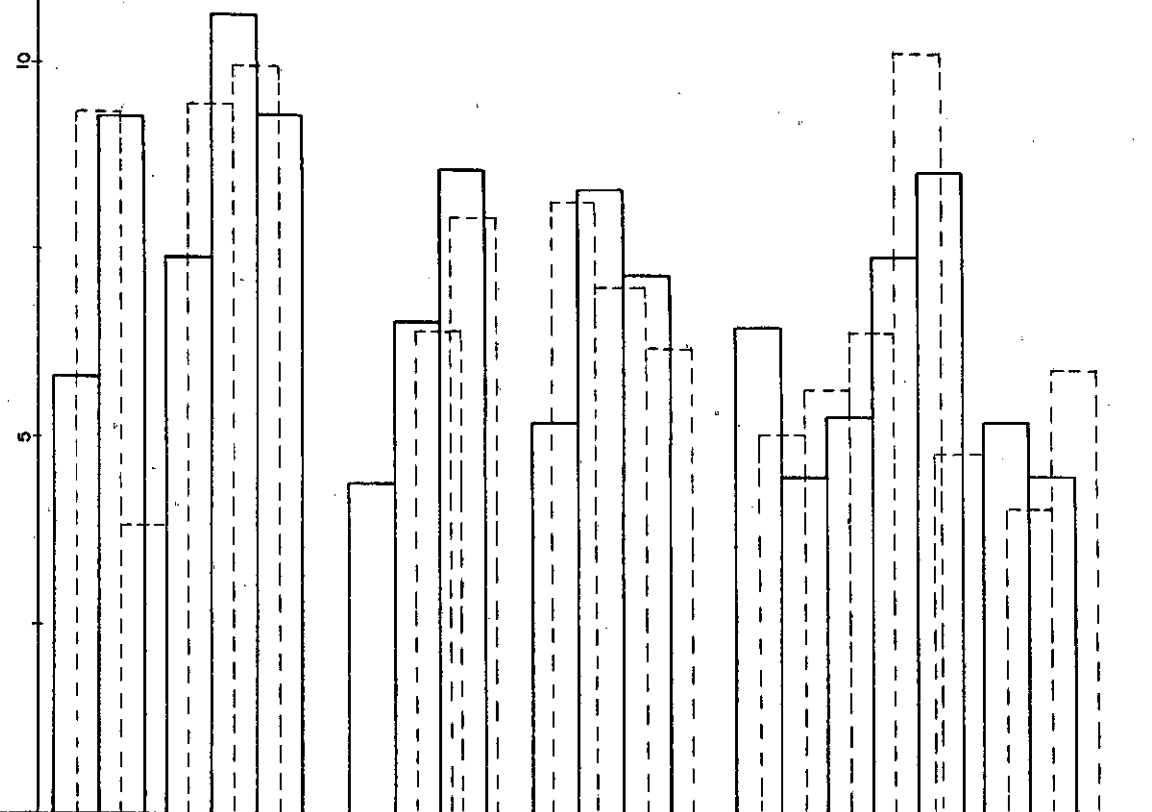
CAB 30  
K15

20  
15  
mm  
Desvio  
Padrão

GRÁFICO VI-9 BACO RS - EIXO

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 06 EM 06 ESTACAS.

Esc. { V 1 cm = 2 mm  
H: 1:20.000



CAB 12

0 6 12 15 18 21 24 27 33 39 45 48 51 57 63 70 75 81 87 90 93 96 99 108 116 128 134+12

ESTACAS

CAB 30  
K13

em  
Desvio  
Padrão

GRÁFICO VI-10 BACO.RS - EIXO

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DA PISTA DE 05 EM 05 ESTACAS.

Esc. { V: 1cm = 2mm  
H: 1:20.000

15  
10  
5

0

25

50

75

100

125

ESTACAS

CAB 30  
km

CAB 12

FIGURA VI.4 - (BASC-RJ)- TRECHOS CRÍTICOS OBTIDOS COM "GABARITO" DE 1,20mx3,0cm E ATRAVÉS DE PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS DIRETOS.

FAIXA DE TRANSIÇÃO  
TRECHO CRÍTICO

Esc.1:12500

FIGURA VI.4.A

GABARITO DE 1,20 x 3,0 cm

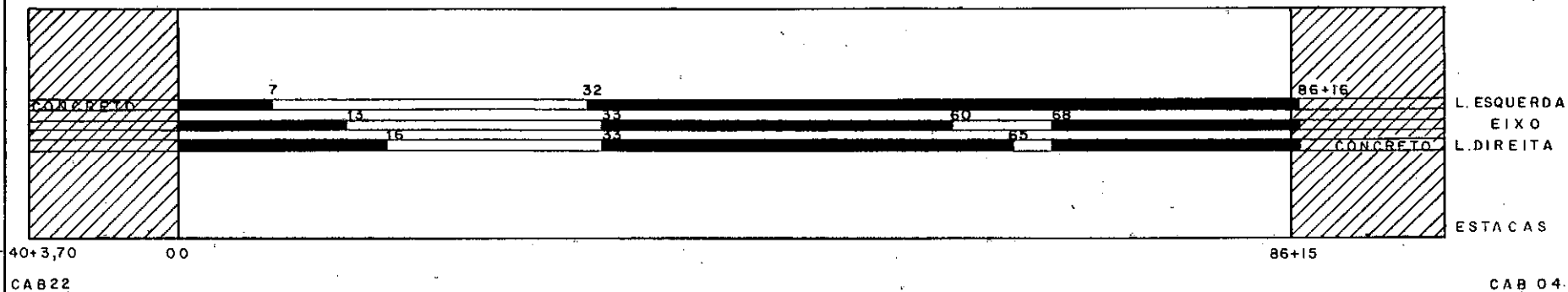


FIGURA VI.4.B

DESVIOS PADRÕES DE 06 EM 06 ESTACAS. (120m)

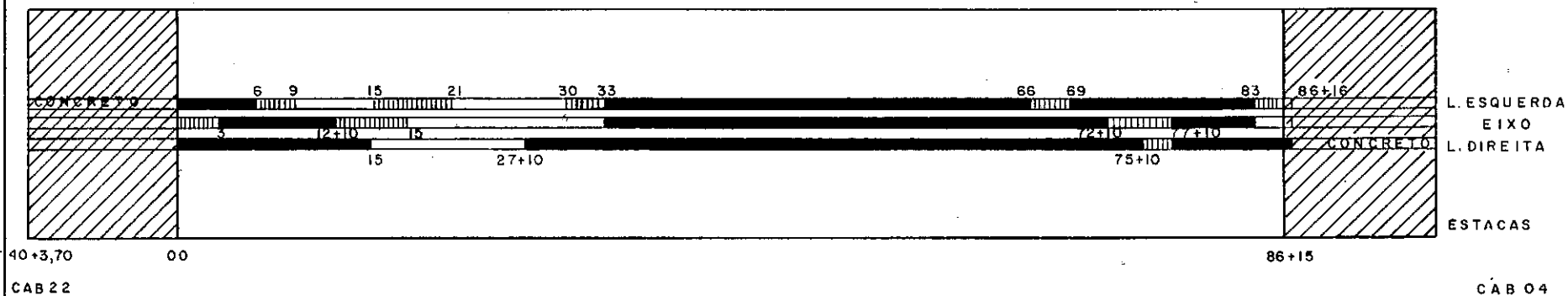


FIGURA VI.4.C

DESVIOS PADRÕES DE 05 EM 05 ESTACAS (100m)

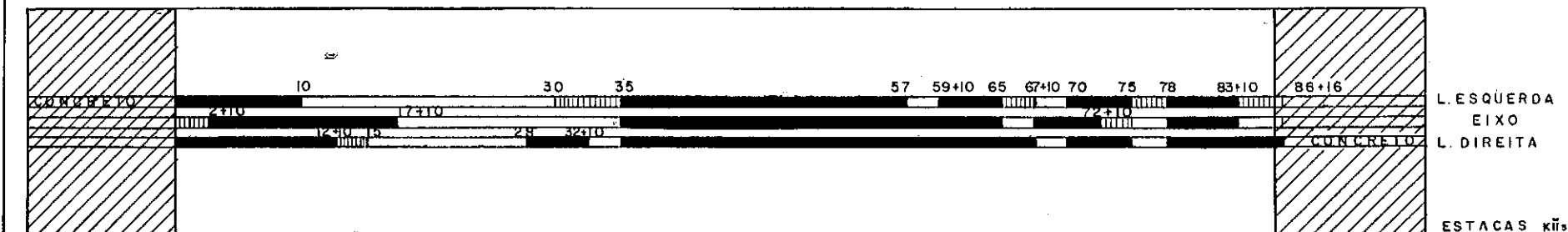


FIGURA VI. 5 - (BACO-RS) - TRECHOS CRÍTICOS OBTIDOS COM "GABARITO" DE 1,20m x 3,0cm E ATRAVÉS DE PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS DIRETOS

FIGURA VI 5.A - TRECHOS CRÍTICOS OBTIDOS COM O "GABARITO".

FAIXA DE TRANSIÇÃO.

TRECHO CRÍTICO.

Esc: 1:12500

CAB.12

CAB.30

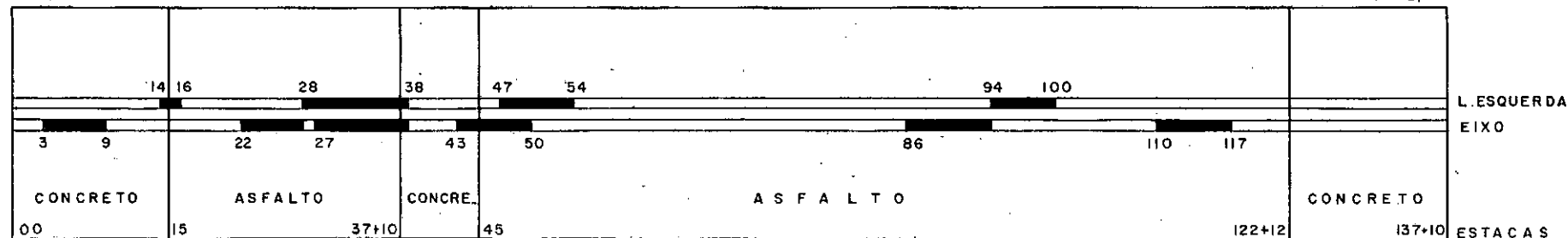


FIGURA VI.5.B - TRECHOS CRÍTICOS OBTIDOS ATRAVÉS DO CÁLCULO DE DESVIOS PADRÕES A CADA 6 ESTACAS (1.20m)

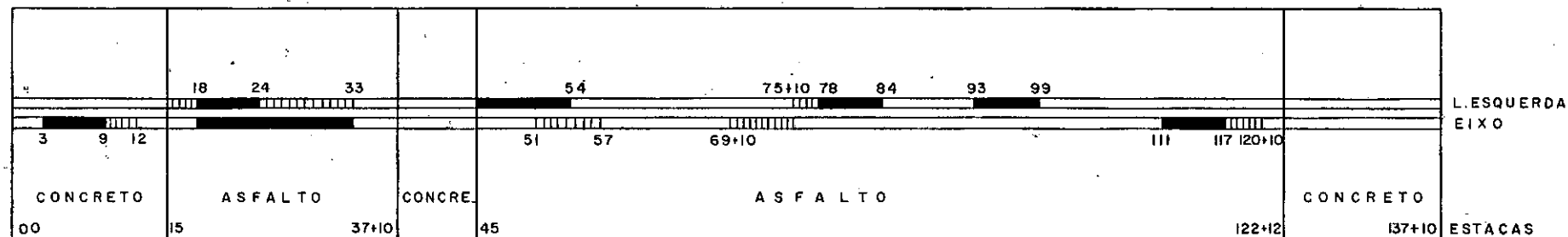
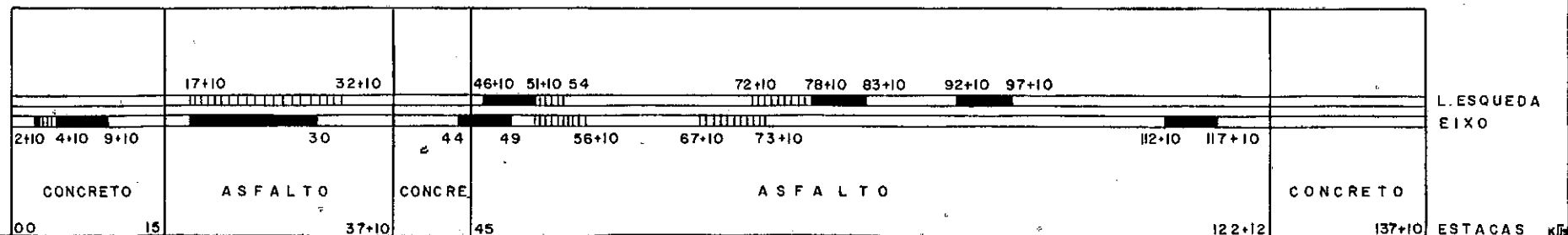


FIGURA VI.5.C - TRECHOS CRÍTICOS OBTIDOS ATRAVÉS DO CÁLCULO DE DESVIOS PADRÕES A CADA 5 ESTACAS (100m)





## CAPÍTULO VII

## ESTUDOS SOBRE INTERAÇÃO DAS AERONAVES F-5B E F-5E COM O PAVIMENTO, NOS PRIMEIROS 800 m EM CONCRETO CIMENTO DA PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE SANTA CRUZ, A PARTIR DA CABECEIRA 22

Este Capítulo tem o objetivo de apresentar, de forma bastante sucinta, os estudos conduzidos nos primeiros 800 m da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (BASC - RJ), com base principalmente no CAPÍTULO III, de natureza teórica, e comprovação da metodologia apresentada no CAPÍTULO VI.

VII-1 ESTABELECIMENTO DO PROBLEMA

Todos esses estudos conduzidos nas duas pistas (BASC-RJ e BACO - RS) visavam explicar, de algum modo, os problemas que estavam ocorrendo na pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz, conforme reclamações dos pilotos de aeronaves caça F-5B e F-5E, já há algum tempo.

Infelizmente, os primeiros estudos foram conduzidos nos trechos onde o problema principal não estava ocorrendo. Assim, novas solicitações foram feitas à Engenharia e no início de fevereiro de 1982, após ouvir atentamente as descrições dos pilotos, verificou-se que o trecho-problema era exatamente nos 800 m iniciais em concreto cimento, a partir da cabeceira 22, onde as placas não exibiam defeitos, nem mesmo suas juntas de dilatação.

As informações dos pilotos davam conta de efeitos nas aeronaves, como se fossem de ressonância, durante a decolagem. Para se sentir de perto esse problema, procedeu-se a uma corrida com uma aeronave F-5B, em 10 de fevereiro de 1982, embora, pela descrição dos operadores das aeronaves, o F-5E fosse mais crítico.

Por questões de ordem técnica, a decolagem foi ABORTADA ao ser atingida a velocidade de 125 nós, o que já fôra suficiente para sentir-se os efeitos, como se a aeronave tivesse

sucessivos incrementos de aceleração vertical.

Tratava-se, então, de estudar como a superfície de rolamento da pista poderia estar causando todos os problemas relacionados pelos pilotos, quais sejam: o de desconforto durante a decolagem e o arriamento do NARIZ da aeronave, o que deveria ocorrer somente após a decolagem, com a distensão dos amortecedores das pernas principais do trem de pouso.

Em condições normais, após a decolagem, a distensão do amortecedor direito aumentaria o ângulo de um dispositivo tipo TESOURA, que empurraria uma haste que, por sua vez, acionaria um *micro-switch*, o qual comandaria, então, o encurtamento da bequilha, para que voltasse, desta forma, a dimensões compatíveis com seu ALOJAMENTO e posterior recolhimento.

Ao ocorrer o arriamento do NARIZ da aeronave, durante um procedimento de decolagem, há necessidade do acréscimo de 25 % da velocidade e 40 % da distância para que a decolagem ocorra.

As informações dos pilotos indicavam que o trecho crítico estaria entre 500 e 700 m., aproximadamente, do início da cabeceira 22, e que na região próxima do eixo e do seu lado esquerdo, havia maior incidência do problema.

## VII-2 METODOLOGIA EMPREGADA

De início, empregou-se toda a metodologia descrita nos CAPÍTULOS IV e VI, incluindo-se apenas mais duas linhas de nivelamento topográfico geométrico, a 13 m à esquerda e à direita do eixo. O objetivo dessa introdução era verificar se os perfis a serem obtidos estariam de acordo com as informações dos pilotos. Os resultados são apresentados nas TABELAS VII-1-A a VII-1-E, FIGURA VII-1 e GRÁFICOS VII-1-A a VII-1-E.

Com os perfis prontos, verificou-se que havia uma região com conformação ondular bastante evoluída (de forma senoidal), a partir da estaca - 17 à estaca - 3. Dessa forma, foi fácil medir os comprimentos de ondas, com respectivas amplitudes ( $A$  e não  $2A$ ), naquele trecho dos cinco (05) perfis, de forma direta, com escala triangular milimetrada. Esses dados são apresentados na TABELA VII-2.

TABELA VII-1-A

RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS FEITAS A PARTIR  
DAS COTAS OBTIDAS NO NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO  
EM TRECHOS DE 120m DE PISTA (06 ESTACAS)

POSIÇÃO DO NIVELAMENTO: a 13,00m à esquerda do eixo

TRECHOS DE 06 ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIO PADRÃO (mm)
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	
-40 a -34	2005	1977	1992	4,94
-36 a -30	2018	1988	2001	8,30
-30 a -24	2024	1994	2009	6,43
-24 a -18	2017	1997	2009	4,55
-18 a -12	2015	1972	1996	10,52
-12 a -06	2013	1962	1982	13,22
-06 a 00	2022	1978	2006	8,82
				X = 8,11
-39 a -33	2012	1985	1995	5,68
-33 a -27	2024	1995	2009	6,73
-27 a -21	2019	1994	2008	5,80
-21 a -15	2015	1987	2004	6,27
-15 a -09	2013	1970	1991	12,82
-09 a -03	2017	1962	1988	16,34
				X = 8,94

X = média

TABELA VII-1-B

RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS FEITAS A PARTIR  
DAS COTAS OBTIDAS NO NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO  
EM TRECHOS DE 120m DE PISTA (06 ESTACAS)

POSIÇÃO DO NIVELAMENTO: a 4,20m à esquerda do eixo

TRECHOS DE 06 ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIO PADRÃO (mm)
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	
-40 a -34	2128	2103	2118	4,58
-36 a -30	2143	2109	2124	7,91
-30 a -24	2144	2109	2125	9,29
-24 a -18	2146	2111	2132	7,94
-18 a -12	2130	2081	2105	12,22
-12 a -06	2145	2071	2098	19,69
-06 a 00	2158	2088	2117	17,56
				X = 11,31
-39 a -33	2131	2109	2120	3,92
-33 a -27	2144	2109	2127	9,66
-27 a -21	2146	2109	2130	9,39
-21 a -15	2134	2082	2115	13,82
-15 a -09	2145	2081	2107	18,21
-09 a -03	2114	2071	2095	11,39
				X = 11,07

X = média

TABELA VII-1-C

RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS FEITAS A PARTIR  
DAS COTAS OBTIDAS NO NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO  
EM TRECHOS DE 120m DE PISTA (06 ESTACAS)

POSIÇÃO DO NIVELAMENTO: eixo da pista.

TRECHOS DE 06 ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIO PADRÃO (mm)
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	
-40 a -34	2184	2163	2176	4,56
-36 a -30	2203	2172	2182	7,86
-30 a -24	2200	2164	2178	9,70
-24 a -18	2198	2170	2186	7,40
-18 a -12	2188	2145	2166	11,75
-12 a -06	2204	2131	2156	19,85
-06 a 00	2203	2140	2167	16,82
				. X = 11,13
-39 a -33	2184	2169	2178	2,83
-33 a -27	2203	2167	2185	9,23
-27 a -21	2198	2164	2182	10,72
-21 a -15	2190	2145	2173	11,08
-15 a -09	2204	2140	2166	18,87
-09 a -03	2169	2131	2150	9,21
				X = 10,32

X = média

TABELA VII-1-D

RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS FEITAS A PARTIR  
DAS COTAS OBTIDAS NO NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO  
EM TRECHOS DE 120m DE PISTA (06 ESTACAS)

POSIÇÃO DO NIVELAMENTO: a 4,20m à direita do eixo

TRECHOS DE 06 ESTACAS	COTAS EM mm			DESVIO PADRÃO (mm)
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	
-40 a -34	2130	2118	2124	2,73
-36 a -30	2147	2119	2127	7,92
-30 a -24	2147	2111	2125	7,72
-24 a -18	2151	2125	2136	6,28
-18 a -12	2137	2086	2113	13,91
-12 a -06	2142	2077	2107	16,80
-06 a 00	2147	2087	2119	18,76
				X = 10,59
-39 a -33	2130	2119	2124	2,63
-33 a -27	2147	2111	2129	9,79
-27 a -21	2151	2115	2133	9,57
-21 a -15	2137	2095	2123	12,06
-15 a -09	2142	2086	2114	15,75
-09 a -03	2130	2077	2101	12,66
				X = 10,41

X = média

TABELA VII-1-E

RESUMO DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS FEITAS A PARTIR  
DAS COTAS OBTIDAS NO NIVELAMENTO TOPOGRÁFICO GEOMÉTRICO  
EM TRECHOS DE 120m DE PISTA (06 ESTACAS)

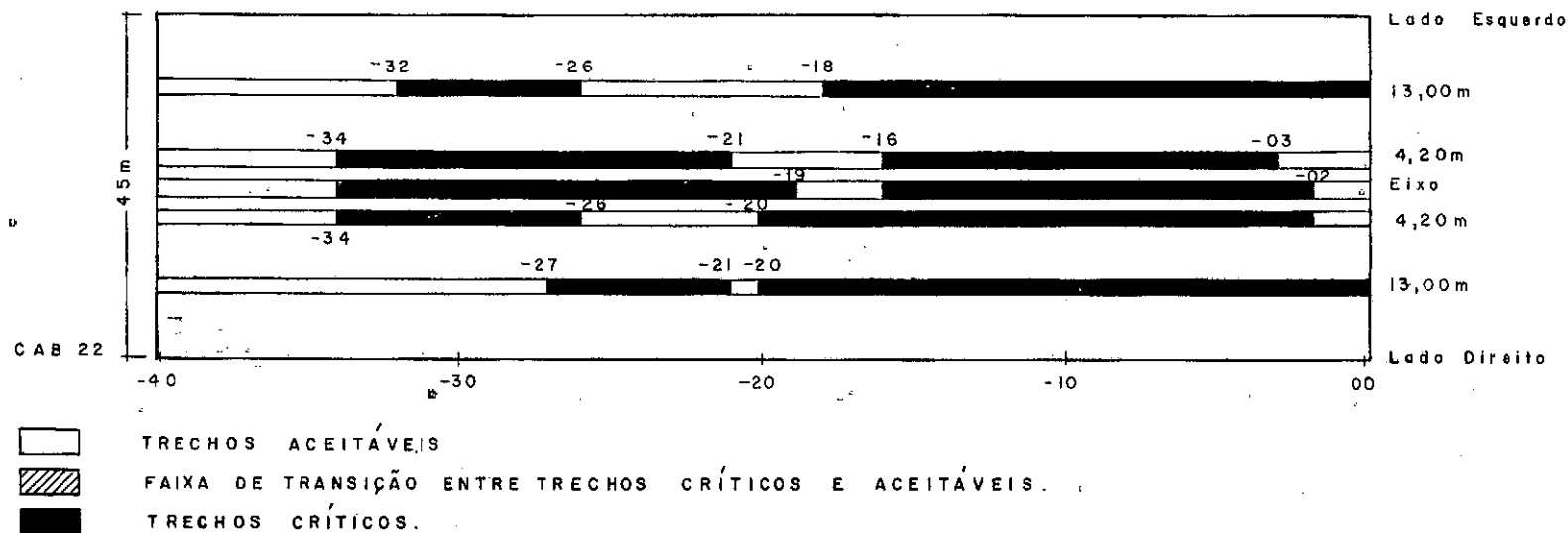
POSIÇÃO DO NIVELAMENTO: a 13,00m à direita do eixo

TRECHOS DE 06 estacas	COTAS DE mm			DESVIO PADRÃO (mm)
	MÁXIMA	MÍNIMA	MÉDIA	
-40 a -34	2014	1990	2001	5,18
-36 a -30	2015	1987	2000	6,30
-30 a -24	2014	1985	2002	6,64
-24 a -18	2026	1993	2009	7,42
-18 a -12	2013	1974	1994	8,11
-12 a -06	2009	1947	1976	15,41
-06 a 00	2018	1951	1994	22,23
				X = 10,18
-39 a -33	2014	1987	1999	6,08
-33 a -27	2015	1985	2003	6,03
-27 a -21	2026	1986	2007	9,19
-21 a -15	2012	1979	1998	8,36
-15 a -09	2013	1960	1990	12,87
-09 a -03	2014	1947	1973	18,78
				X = 10,22

X = média

FIGURA VII-1(BASC-RJ) - REPRESENTAÇÃO DOS TRECHOS CRÍTICOS, SEGUNDO OS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DESCRITOS NO CAPÍTULO VI

VII 1.A ANÁLISE FEITA COM "GABARITO" DE 1,20m x 3,0 cm



VII 1.B. ANÁLISE FEITA ATRAVÉS DE PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS

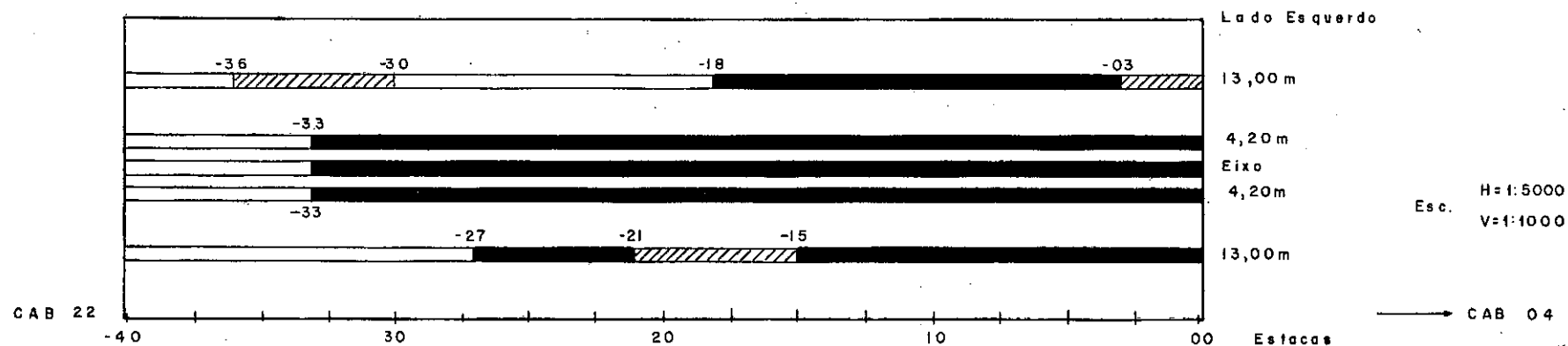




GRÁFICO VII-1-A

BASC - RJ - 13,00m À ESQUERDA DO EIXO.

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DO TRECHO DE CONCRETO  
DA CAB. 22 DE 06 EM 06 ESTACAS.

H = 1cm = 40m  
Esc. V: 1cm = 2mm

mm  
Desvio  
Padrão

30

20

10

Ruim

9,15

Faixa de Transição

8,13

Aceitável

CAB 22

-40-39

-33

-30

-27

-20

-15

-10

-3

0

ESTACAS

CAB 04

GRÁFICO VII-1-B

BASC - RJ - 4,20m À ESQUERDA DO EIXO.

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DO TRECHO DE CONCRETO  
DA CAB. 22 DE 06 EM 06 ESTACAS

H: 1cm = 40m  
Esc. V: 1cm = 2mm

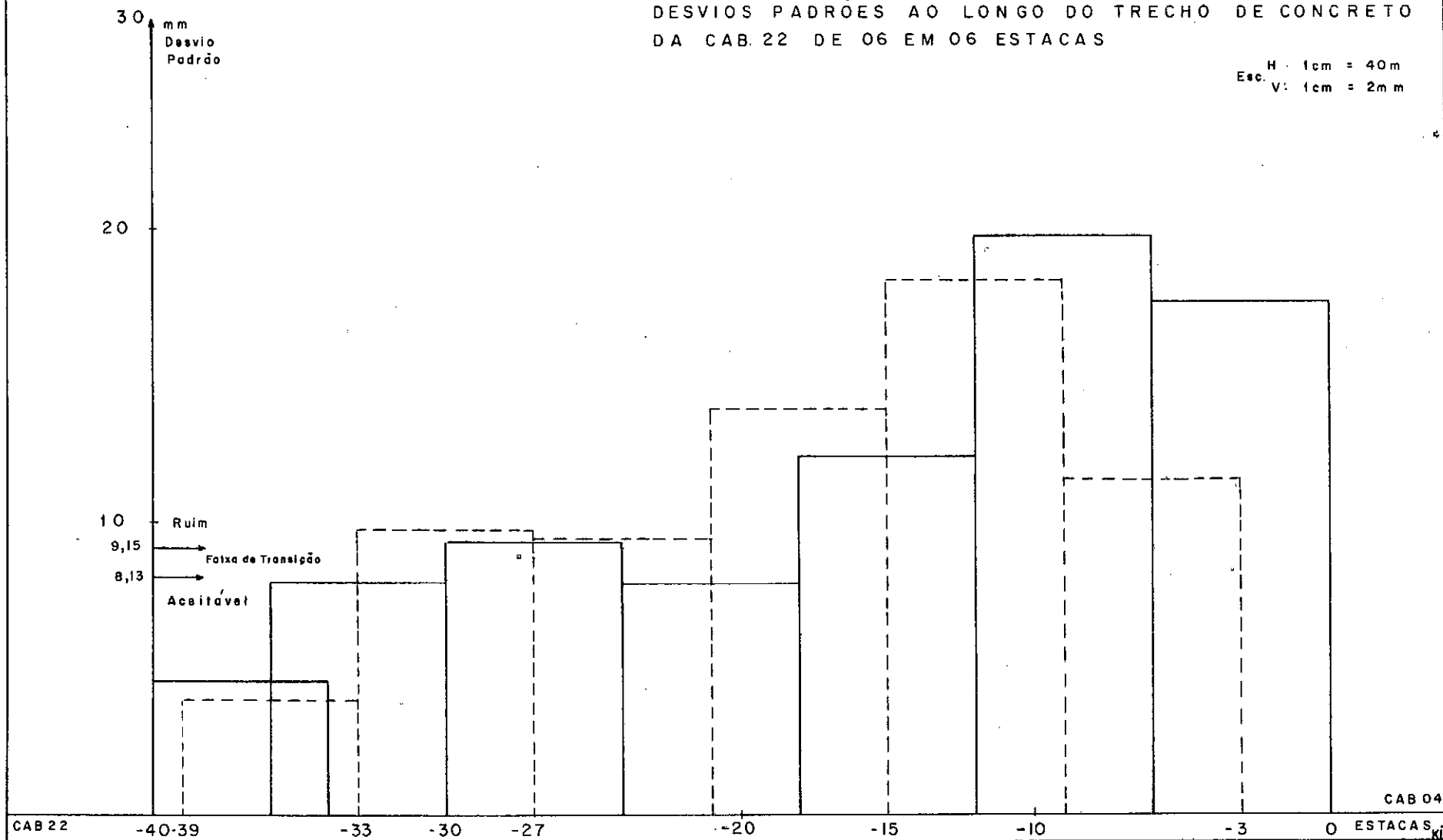


GRÁFICO VII-1-C

BASC - RJ - EIXO

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DO TRECHO DE CONCRETO  
DA CAB.22 DE 06 EM 06 ESTACAS.

H = 1cm = 40m  
Esc. V: 1cm = 2mm

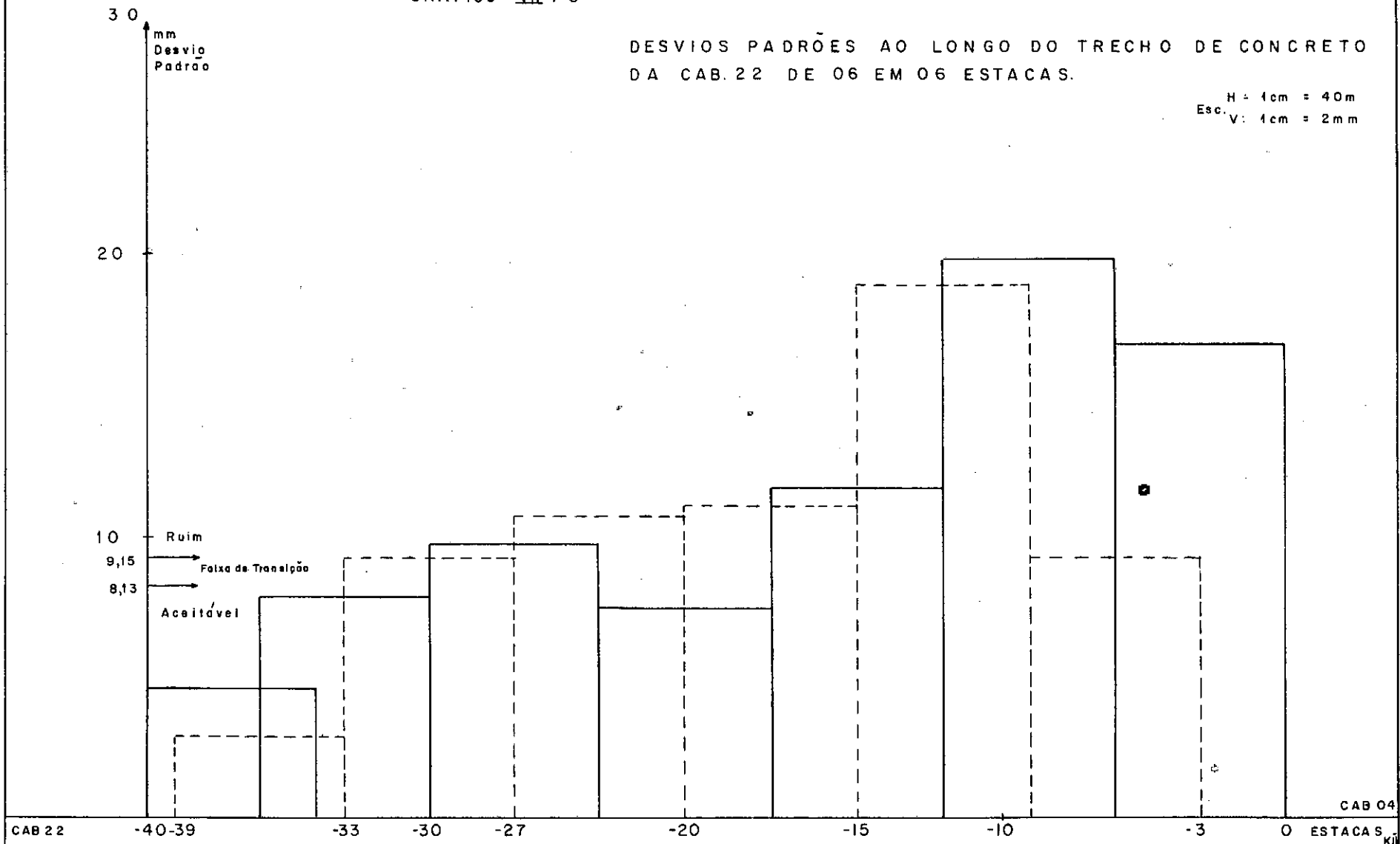


GRÁFICO VII-I-D

BASC - RJ - 4.20 m À DIREITA DO EIXO.

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DO TRECHO DE CONCRETO  
DA CAB. 22 DE 06 EM 06 ESTACAS.

H: 1cm = 40m  
Esc. V: 1cm = 2mm

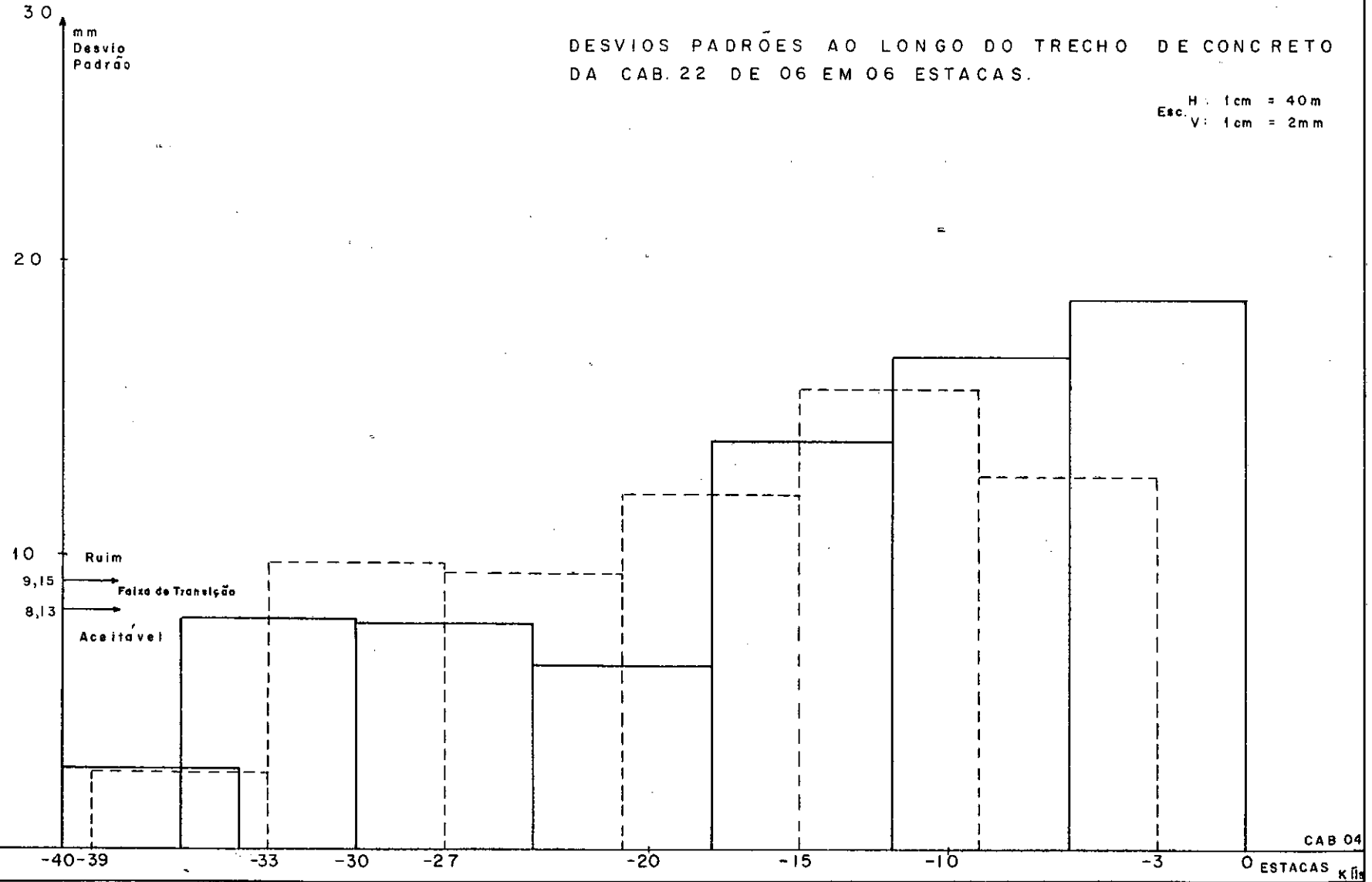
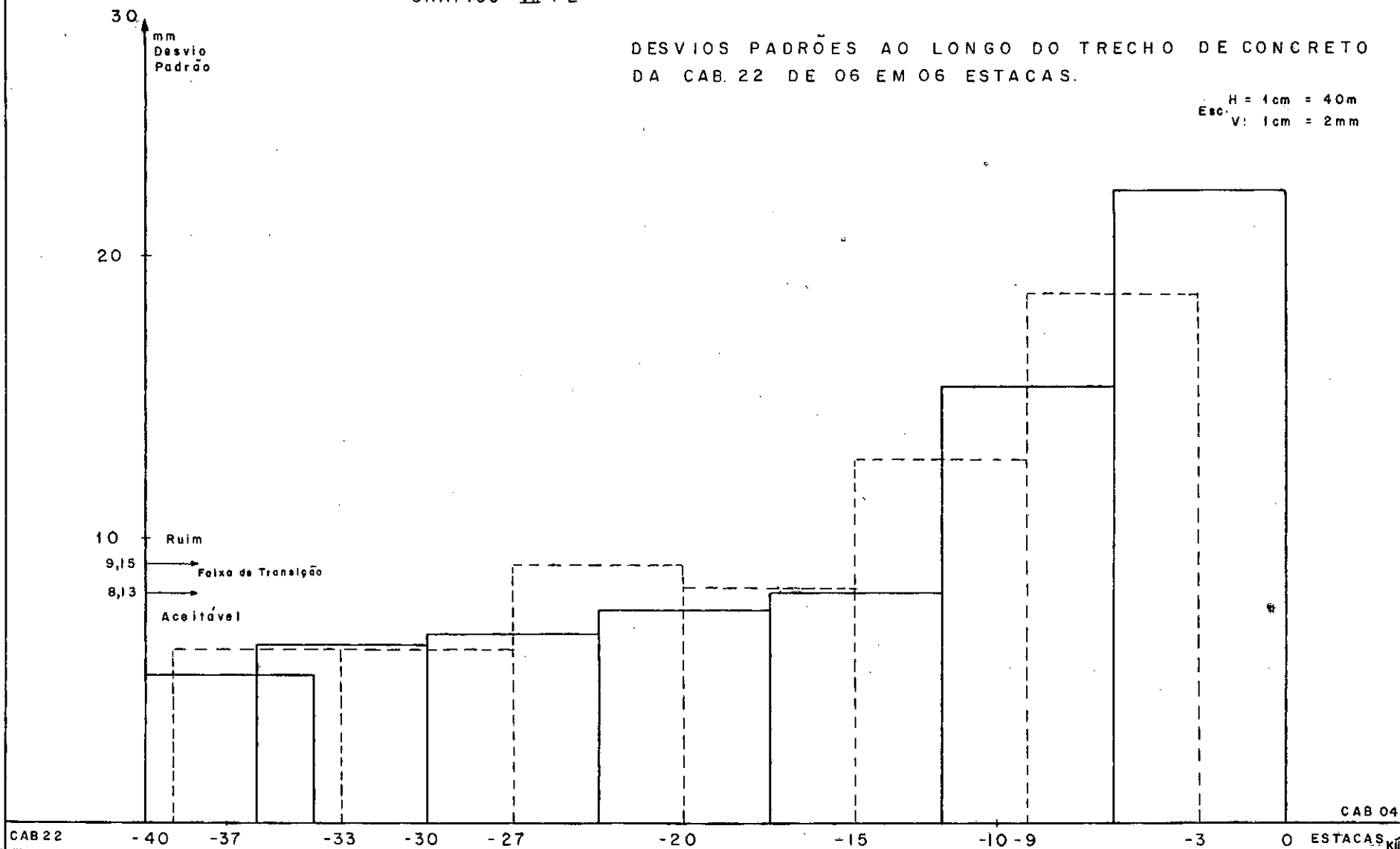


GRÁFICO VII-1-E

BASC - RJ - 13,00m À DIREITA DO EIXO.

DESVIOS PADRÕES AO LONGO DO TRECHO DE CONCRETO  
DA CAB. 22 DE 06 EM 06 ESTACAS.

H = 1cm = 40m  
Esc. V: 1cm = 2mm



CAB 04

CAB 22

TABELA VII-2

COMPRIMENTOS DE ONDAS COM RESPECTIVAS AMPLITUDES MÁXIMAS  
QUE POSSAM INTERESSAR E SUAS DISTÂNCIAS EM RELAÇÃO  
À ORIGEM DA CABECEIRA 22

POSIÇÃO DO NIVELAMENTO	ESTACAS	DISTÂNCIAS DA CABECEIRA 22 (m)	COMPRIMENTOS DE ONDA (L) (m)	AMPLITUDES MÁXIMAS (A) (cm)
LINHA ESQUERDA A 13,00m DO EIXO	-14+10 a -11+12	513 a 580	67,0	2,2
	-13+ 3 a -10+ 8	540 a 595	55,0	2,2
	-11+12 a - 9+ 7	571 a 616	45,0	2,2
LINHA ESQUERDA A 4,20m DO EIXO	-15+15 a -13+18	488 a 525	37,0	2,1
	-15 a -12+12	503 a 551	48,0	2,5
	-13+18 a -11+ 1	525 a 581	56,0	3,2
	-12+12 a - 9+ 9	551 a 608	57,0	3,3
	-11+ 1 a - 8+ 9	582 a 634	52,0	2,5
	- 9+ 9 a - 7	614 a 671	57,0	1,8
	- 8+12 a - 6	631 a 680	49,0	2,0
	- 7 a - 5+ 6	663 a 697	34,0	1,1
EIXO	- 6 a - 4+ 4	683 a 718	35,0	1,2
	-15+18 a -13+15	485 a 528	43,0	2,0
	-14+16 a -12+ 5	507 a 558	51,0	2,2
	-13+15 a -11+ 1	528 a 582	54,0	2,7
	-12+ 3 a - 9+ 6	560 a 617	57,0	3,0
	-11 a - 7+17	583 a 646	63,0	2,2
	- 9+ 6 a - 6+19	617 a 664	47,0	1,6
	- 7+17 a - 5+19	646 a 684	38,0	0,8
	- 6+19 a - 5	664 a 704	40,0	0,8
	- 5+19 a - 4+ 2	684 a 721	37,0	0,8
LINHA DIREITA A 4,20m DO EIXO	- 5 a - 3+ 6	703 a 736	33,0	0,6
	-16+ 7 a -13+13	476 a 530	54,0	2,2
	-14+16 a -12+ 2	507 a 561	54,0	2,6
	-13+11 a -10+10	532 a 593	61,0	2,6
	-12 a - 9+ 4	563 a 619	56,0	2,4
	-10+10 a - 7+18	593 a 645	52,0	1,5
	- 9+ 4 a - 6+17	619 a 666	47,0	1,5
	- 7+16 a - 5+14	647 a 689	42,0	1,2
LINHA DIREITA A 13,0m DO EIXO	- 6+17 a - 4+15	665 a 709	34,0	0,9
	-12+18 a -10	545 a 604	59,0	2,2
	-10+19 a - 8+10	584 a 633	49,0	2,2
	-10 a - 7+11	603 a 651	48,0	2,2

VII-3      ESTUDOS DA INTERAÇÃO AERONAVES F - 5B E F - 5E COM O  
PAVIMENTO - O PROBLEMA DE RESSONÂNCIA

Levando-se em conta as afirmações de vários autores já mencionados no CAPÍTULO III - Ítem III-2.1 (HAAS & HUDSON<sup>8</sup>, HALL & KOPELSON<sup>7</sup>, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, MORRIS<sup>17,18</sup>, MORRIS & HALL<sup>19</sup> e TUNG *et al*<sup>31,32</sup>) de que existe uma estreita relação entre velocidade das aeronaves, suas frequências fundamentais e os comprimentos de onda da superfície dos pavimentos, procurou-se verificar se este TRINÔMIO realmente se concretizava no caso da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz. Dessa forma, apresentam-se no QUADRO VII-1-A os dados relativos às duas aeronaves para cinco situações diferentes. (NORTHROP CORPORATION<sup>21, 22</sup>)

A partir desse quadro e com a expressão (III-28), encontrada por LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>

$$\log m = -2,0 \log f + 3,35$$

calcularam-se as frequências de respostas apresentadas no QUADRO VII-2.

Diante da bibliografia levantada e de desenvolvimentos teóricos, como os de LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> e YANG<sup>36</sup>, não houve outra alternativa, senão pensar em problemas de ressonância, pelo menos devido às quatro (04) considerações feitas abaixo:

- 1a.) A descrição do problema pelos pilotos demonstrava um caso típico de ressonância entre a aeronave e as irregularidades da superfície do pavimento.
- 2a.) A sensação sentida no momento da corrida feita com a aeronave F - 5B, no dia 10 de fevereiro de 1982, que confirmava a primeira consideração.
- 3a.) Ao se analisar os perfis topográficos, encontraram-se conformações ondulares evoluídas de forma senoidal, onde se verificaram comprimentos de onda acima de 30 m (estaca - 17 à estaca - 3).
- 4a.) A coincidência das informações dos pilotos sobre a região da pista onde os problemas ocorriam com maior frequência e o que se encontrou nos perfis topográficos.

Com as velocidades aproximadas das aeronaves apresentadas no QUADRO VII-1-B (NORTHROP CORPORATION<sup>21, 22</sup>) e com as frequências de resposta (QUADRO VII-2) para cada situação, foram estimados os comprimentos críticos de onda.

Resumiram-se, então, na TABELA VII-3, os comprimentos críticos de ondas para as condições de operação das aeronaves (peso de decolagem e velocidades a cada 100 m) e faixas de comprimentos de onda em cada trecho da pista (de 100 em 100 m), a partir dos 500 m iniciais, onde realmente há interesse.



## QUADRO VII-1-A

## DADOS RELATIVOS ÀS AERONAVES F - 5B E F - 5E

SITUAÇÕES	AERONAVES	PESO DE DECOLAGEM (lb)
1	F - 5B	15 275
2	F - 5B	13 993
3	F - 5E	16 658
4	F - 5E	17 501
5	F - 5E	15 455

## QUADRO VII - 1-B

DISTÂNCIAS A CADA 100 m DA ORIGEM DA CABECEIRA 22  
E RESPECTIVAS VELOCIDADES EM NÓS

SITUAÇÕES	DISTÂNCIAS EM m								
	100	200	300	400	500	600	700	800	900
1	56	70	85	99	110	120	130	140	149
2	57	75	93	108	120	131	142	152	162
3	57	78	96	110	125	137	147	-	-
4	57	76	94	109	122	134	144	-	-
5	60	82	101	118	132	142	-	-	-

## QUADRO VII-2

## DADOS OBTIDOS A PARTIR DAS INFORMAÇÕES DO QUADRO VII-1-A

SITUAÇÕES	MASSA (lb.s <sup>2</sup> .ft <sup>-1</sup> )	FREQUÊNCIA DE RESPOSTA (c/s)
1	474,38	2,17
2	434,57	2,27
3	517,33	2,08
4	543,51	2,03
5	480,00	2,16

$$\log m = -2,0 \log f + 3,35$$

TABELA VII-3 (BASC-RJ) COMPARAÇÃO ENTRE OS COMPRIMENTOS CRÍTICOS DE ONDAS PARA CADA AERONAVE COM RESPECTIVAS SITUAÇÕES E COMPRIMENTOS DE ONDAS MEDIDOS NOS PERFIS TOPOGRÁFICOS DA PISTA.

TIPOS DE AERONAVE SITUAÇÕES DISTÂNCIAS A PARTIR DO INÍCIO DA CABECEIRA 22 COMPRIMENTOS CRÍTICOS DE ONDAS (1) FAIXA DE COMPRIMENTOS DE ONDAS (2)	F - 5 B									F - 5 E								
	1			2			3			4			5					
	500 a 600 m	600 a 700 m	700 a 800 m	500 a 600 m	600 a 700 m	700 a 800 m	500 a 600 m	600 a 700 m	700 a 800 m	500 a 600 m	600 a 700 m	700 a 800 m	500 a 600 m	600 a 700 m	700 a 800 m			
	26 a 29 m	29 a 31 m	31 a 33 m	27 a 30 m	30 a 32 m	32 a 35 m	31 a 34 m	34 a 36 m	34 m	31 a 34 m	34 a 37 m	37 m	32 a 34 m	34 m	34 m			
LADO ESQUERDO. - 13 m DO EIXO	45 a 67 m	—	—	45 a 67 m	—	—	45 a 67 m	—	—	45 a 67 m	—	—	45 a 67 m	—	—	45 a 67 m	—	—
LADO ESQUERDO - 4,20 m DO EIXO	37 a 57 m	34 a 57 m	—	37 a 57 m	34 a 57 m	—	37 a 57 m	34 a (*) 57 m	—	37 a 57 m	34 a (*) 57 m	—	37 a 57 m	34 a (*) 57 m	—	37 a 57 m	34 a (*) 57 m	—
E I X O	43 a 57 m	38 a 63 m	33 a (*) 37 m	43 a 57 m	38 a 63 m	33 a (*) 37 m	43 a 57 m	38 a 63 m	33 a (*) 37 m	43 a 57 m	38 a 63 m	33 a (*) 37 m	43 a 57 m	38 a 63 m	33 a (*) 37 m	43 a 57 m	38 a 63 m	33 a (*) 37 m
LADO DIREITO - 4,20 m DO EIXO	54 a 61 m	34 a 52 m	—	54 a 61 m	34 a 52 m	—	54 a 61 m	34 a (*) 52 m	—	54 a 61 m	34 a (*) 52 m	—	54 a 61 m	34 a (*) 52 m	—	54 a 61 m	34 a (*) 52 m	—
LADO DIREITO - 13 m DO EIXO	59 m 49 m	48 a 49 m	—	59 m 49 m	48 a 49 m	—	59 m 49 m	48 a 49 m	—	59 m 49 m	48 a 49 m	—	59 m 49 m	48 a 49 m	—	59 m 49 m	48 a 49 m	—

(\*) CONDIÇÕES CRÍTICAS DE OPERAÇÃO (1) DADOS TIRADOS DOS QUADROS VII-B-e VII.2.  
(2) DADOS TIRADOS DA TABELA VII-2.

## CAPÍTULO VIII

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Devido ao fato do rugosímetro tipo BPR fazer integrações de pequenas irregularidades, não se consegue, com o resultado de suas medições, desenvolver estudos que conduzam a um entendimento melhor da interação da aeronave com o pavimento. No entanto, pelo que foi observado, pode-se utilizar esse equipamento para estudos comparativos entre pistas ou entre faixas dentro de pistas.

Ao se comparar os coeficientes de variação obtidos para os índices de rugosidade das duas pistas (TABELAS V-2 e V-5.A), verifica-se que há uma maior uniformidade entre os resultados encontrados na pista de pouso da Base Aérea de Canoas (RS), principalmente no que diz respeito aos trechos de concreto asfáltico.

Através de análise de variância, constatou-se que as linhas estudadas no concreto cimento da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ) - TABELA V-3.A, não se mostraram estatisticamente diferentes, como se observou nos trechos de concreto asfáltico (TABELA V-3.B), onde as diferenças foram altamente significativas (ao nível de 99 % de probabilidade). Assim, os índices de rugosidade encontrados no eixo e nas duas linhas mais próximas dele, apresentaram-se estatisticamente iguais (ao nível de 99 %); porém, as três foram diferentes das duas outras mais distantes (8,40 m do eixo à esquerda e à direita), que mostraram idêntico comportamento estatístico, com os menores índices de rugosidade.

Quanto à pista de pouso da Base Aérea de Canoas (RS), foram constatadas diferenças altamente significativas para os índices de rugosidade, tanto para os trechos de concreto cimento, como para os de concreto asfáltico (TABELAS V-6.A e V-6.B).

No caso do concreto cimento, todas as linhas estudadas, à exceção do eixo, apresentaram o mesmo comportamento estatístico, com índices de rugosidade mais baixos (altamente significativo). Durante os trabalhos de campo, foi observado que a linha de eixo da pista coincide com uma junta de dilatação.

Com relação ao concreto asfáltico, os menores índices de rugosidade foram apresentados pelas duas linhas à esquerda do eixo e no próprio eixo. No lado direito, a linha situada a 8,40 m do eixo apresentou índices de rugosidade estatisticamente superiores aos da linha situada a 4,20 m do eixo que, por sua vez, mostrou índices maiores do que as outras três.

Com base na classificação da International Civil Aviation Organization - ICAO<sup>14</sup>, para perfilômetro de rodas múltiplas e na equação de correlação (IV-1) de HAAS & HUDSON<sup>8</sup>, observa-se nos resumos apresentados nas TABELAS VIII-1 (BASC - RJ) e VIII-2 (BACO - RS) que no caso da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), esta pode ser classificada como BOA e MUITO BOA, ao se considerar o percentual relativo a cada categoria de índice de rugosidade (MUITO BOM, BOM, REGULAR, RUIM, etc) das linhas estudadas, praticamente acima de 95 % do comprimento da pista.

No caso da pista de pouso da Base Aérea de Canoas (RS), esse percentual ainda é alto, acima de 85 %, com exceção do eixo, cujo valor atingiu apenas 70 %, embora os 30 % restantes (de classificação REGULAR e RUIM) sejam mais representativos para o concreto cimento.

Com relação ao estudo de distribuição das BACIAS, verificou-se que, em termos médios, há um balanço entre os comprimentos (CORDAS) e as amplitudes (dupla amplitude - 2A) no sentido da concavidade, tanto PARA CIMA, como PARA BAIXO. Nas duas pistas estudadas, os valores médios obtidos no concreto asfáltico exibiram um maior peso, para mostrar uma pequena diferença no cômputo geral, nos seguintes aspectos:

. No caso da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), o comprimento médio de CORDA da linha estudada a 4,20 m à direita do eixo, correspondeu a 83% e 85% dos valores encontrados, respectivamente para a linha a 4,20 m à esquerda do eixo, e no eixo. Para as amplitudes médias máximas, esses valores foram de 83 % e 90 %, respectivamente.

. Para a pista de pouso da Base Aérea de Canoas (RS), a linha estudada no eixo apresentou comprimento médio de CORDA equivalente a 68 % da linha estudada à esquerda do eixo, e no caso da amplitude média máxima (2A), esse valor foi de 74 %.

Analisando-se as TABELAS VI-3 (BASC - RJ) e VI-4 (BA-CO - RS), verifica-se que, no caso da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), o número de BACIAS / 100 m de pista para os trechos de concreto cimento indicou uma maior incidência de BACIAS de 2 e 3 m para o lado esquerdo, de 4 e 5 m para o eixo, e de 4 a 7 m para o lado direito. Para a pista da Base Aérea de Canoas, constatou-se maior incidência de BACIAS de 2 a 7 m do lado esquerdo, e de 2 a 5 m no eixo.

Quanto aos trechos de concreto asfáltico, na pista de Santa Cruz (RJ), houve maior incidência de BACIAS de 8 e 9 m para o lado esquerdo, e de 10 e 11 m para o eixo e lado direito. No caso de Canoas (RS), observou-se grande incidência de BACIAS com 2 a 5 m para o lado esquerdo, sendo que no trecho mais longo de concreto asfáltico, houve maior índice de BACIAS / 100 m de pista com 10 a 11 m de CORDA. No eixo, a maior expressividade foi de BACIAS com 2 e 3 m.

Nas mesmas TABELAS (VI-3 e VI-4), observa-se pelo número de BACIAS / 100 m de pista, que há uma tendência a menores comprimentos de BACIAS nos trechos de concreto cimento.

Com relação a grandes BACIAS, pela TABELA VI-5, pode-se verificar que a pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ) apresenta deformações significativamente maiores, com BACIAS de até 300 m no eixo, enquanto no caso de Canoas (RS) esses comprimentos máximos, identificáveis no perfil topográfico, se situaram entre 56 e 69 m.

Observou-se que, sob todos os aspectos, os perfis de nivelamento topográfico geométrico da pista de pouso da Base Aérea de Canoas (RS) foram, com base na análise visual, significativamente melhores do que os obtidos para a pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ).

As TABELAS VI-6.1 a VI-6.10 e VI-7.1 a VI-7.10 possibilitaram uma série de considerações à luz da estatística. É conhecido, por exemplo, que numa distribuição normal, o desvio médio absoluto ( $\Delta$ ) pode ser relacionado com o desvio padrão ( $\sigma$ ) através da equação (VIII-1) (BRITTO<sup>3,4</sup>, GRANER<sup>6</sup>, SPIEGEL<sup>28</sup>, WONNACOTT & WONNACOTT<sup>35</sup>).

$$\Delta = \sigma \frac{\sqrt{2}}{\pi} \rightarrow \Delta = 0,7979 \sigma \quad (\text{VIII-1})$$

Ao se verificar o quociente  $\frac{\Delta}{\sigma}$  dos trechos para os quais foram feitas análises, ver-se-á que a relação (VIII-I) não foi perfeitamente observada, variando abaixo e acima de 80%. Ao se considerar o valor médio de cada TABELA isolada, a relação  $\Delta/\sigma$  situa-se entre 0,80 a 0,85, com exceção apenas de um quociente igual a 0,77.

Outra forma de se verificar se a distribuição aproxima-se da normal, é considerar-se que, teoricamente, 95,73% e 99,73% dos desvios médios absolutos devem ser menores, respectivamente, do que  $2\sigma$  e  $3\sigma$ . Ou seja, 4,27% maiores que  $2\sigma$  e 0,27% maiores que  $3\sigma$ . Novamente, observando-se os percentuais encontrados para cada trecho, dentro de cada TABELA, isso não ocorre exatamente; contudo, ao se fazer o cômputo geral, verifica-se a seguinte situação:

BASC - RJ	{ análise a cada 120 m - 96,09 a 97,14% < $2\sigma$
	{ análise a cada 100 m - 96,35 a 97,53% < $2\sigma$
BACO - RS	{ análise a cada 120 m - 95,79 a 97,92% < $2\sigma$
	{ análise a cada 100 m - 95,86 a 97,85% < $2\sigma$

Quanto ao limite de  $3\sigma$ , praticamente sô ocorreram percentagens maiores em 9% dos trechos estudados (34 ocorrências em 366 trechos de 120 m ou de 100 m). Se a média de cada TABELA representasse a realidade, somente um valor (0a53%) excederia o limite de 0,27%.

Em síntese, levando-se em conta a média geral de todos os dados analisados, estar-se-ia bem próximo de uma distribuição normal.

O limite do desvio padrão proposto por SONNENBURG <sup>27</sup>, para se considerar um trecho crítico, foi de 9,15 mm. Como nas cadernetas de nivelamento topográfico geométrico, as cotas estavam em milímetros, ao se fazer o cômputo dos desvios médios absolutos maiores do que esse limite, foram relacionados, apenas, valores iguais ou maiores do que 10 mm. A inclusão desses dados nas TABELAS, permitiu importante observação: sempre que um trecho, tanto de 120 m como de 100 m de pista, com raríssimas exceções, apresentasse desvio padrão acima daquele limite proposto, pelo menos 30% (aproximadamente 1/3 dos desvios absolutos) seriam maiores do que 10 mm. Em termos de uma distri-

buição normal, isso equivaleria a se ter, no máximo, 68,72 % de desvios absolutos  $< 10 \text{ mm}$ , onde o desvio padrão fosse  $\sigma = 10 \text{ mm}$ .

Como os resultados obtidos mostraram boa relação entre o critério desenvolvido a partir dos trabalhos de HOUBOLT<sup>12</sup> (GABARITO de  $1,20 \text{ m} \times 3,0 \text{ cm}$ ) e o de SONNENBURG<sup>27</sup> (aspecto que será discutido posteriormente), e partindo-se também da relação encontrada por HOUBOLT<sup>1</sup> critério NECESSITA REPAROS =  $\sqrt{3} \times$  critério CONSTRUÇÃO NOVA - equação (VI-7):

$\sigma' = \sqrt{3} \times 1,46 \times 10^{-3} \times \sqrt{L}$ , pode-se chegar não só a um GABARITO com base na equação (VI-6)  $\rightarrow \sigma' = 1,46 \times 10^{-3} \sqrt{L}$ , como também estabelecer-se o limite máximo tolerável do desvio padrão para construção ou restauração de uma pista.

Como o critério NECESSITA REPAROS =  $\sigma$  crítico =  $\sqrt{3} \times$  critério CONSTRUÇÃO NOVA,

$$\sigma \text{ para CONSTRUÇÃO NOVA} = \frac{\sigma \text{ crítico}}{\sqrt{3}} \quad (\text{VIII-2})$$

Com base no que já se expôs, levando-se em conta as experiências de SONNENBURG<sup>27</sup> e as considerações estatísticas feitas sobre o comportamento dos desvios médios absolutos em relação a  $10 \text{ mm}$ , da equação (VIII-2) chega-se a:

$$\sigma = \frac{10 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \text{ ou } \boxed{\sigma' = 5,77 \text{ mm}}$$

Poderia parecer precipitação admitir-se as considerações acima. Contudo, voltando-se às TABELAS VI-6.1 a VI-6.10 e VI-7.1 a VI-7.10, e lembrando-se ainda que a pista de Santa Cruz (RJ) é aproximadamente duas vezes mais RUGOSA (contém mais irregularidades) do que a de Canoas (RS) - como deverá ser exposto - eliminando-se os valores dos desvios padrões críticos em cada TABELA (onde se encontram grifados) e calculando-se a média de todos os desvios padrões restantes (considerados não problemáticos), ao se admitir que os mesmos estão distribuídos ao acaso, encontra-se:

PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE CANOAS (RS)  
Média de 117 desvios padrões = 5,57 mm

PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE SANTA CRUZ (RJ)  
Média de 111 desvios padrões = 5,84 mm

Tomando-se a média dos desvios padrões considerados não problemáticos das duas pistas, vem:

$$\sigma' = \frac{5,57 + 5,84}{2} \quad \text{ou} \quad \sigma' = 5,71 \text{ mm}$$

Obtêm-se, assim, um excelente arranjo entre os dois valores de  $\sigma'$  encontrados, que não estaria muito distante do desvio padrão encontrado por MORRIS & STICKLE<sup>20</sup> ( $\sigma = 4,9 \text{ mm}$ ) para uma pista de rolamento nova em concreto cimento que, segundo a opinião dos pilotos, se apresentava bem melhor do que as médias das pistas comerciais consideradas boas, em termos de irregularidades, ou dos resultados encontrados por WALLS *et al*<sup>31</sup>, que obtiveram um desvio padrão de 17,4 mm para uma pista tida como RUGOSA, e outro de 6,4 mm para outra pista considerada mais LISA. Outro aspecto de destaque, é que esses valores (de  $\sigma'$ ) são bem menores do que aquele encontrado por SONNENBURG<sup>27</sup>, como média dos desvios padrões das 21 pistas por ele estudadas. Além do mais, nos seus estudos, 5,71 ou 5,77 mm estariam acima dos 9 melhores resultados encontrados por ele e abaixo dos 12 desvios padrões das piores pistas objeto de seus estudos.

Ao se pensar num GABARITO a ser utilizado, como foi a bordado nos CAPÍTULOS IV e VI, partindo-se dos resultados de HOU BOLT<sup>12</sup> de que o critério por ele estudado como NECESSITA REPAROS é igual a  $\sqrt[3]{3}$  x critério CONSTRUÇÃO NOVA, e com base na equação (VI-6) tem-se, então:

$$\sigma' = 1,46 \times 10^{-3} \sqrt[3]{L} \text{ e para } L = 120 \text{ m} = 393,7 \text{ pés}$$

$$\sigma' = 1,46 \times 10^{-3} \times \sqrt[3]{393,70} \rightarrow \sigma' = 28,97 \times 10^{-3} \text{ pés} \rightarrow \sigma' = 0,883 \text{ cm}$$



e  $2\sigma' = 1,77 \text{ cm}$  , ou partindo-se do  $\sigma'$  crítico do GABARITO de  $1,20 \text{ m} \times 3,0 \text{ cm}$  :

$$2\sigma' = \frac{3,06}{\sqrt{3}} \rightarrow 2\sigma' = 1,77 \text{ cm}$$

Para se fazer comparação entre os métodos empregados, o do GABARITO de  $1,20 \text{ m} \times 3,00 \text{ cm}$  e o dos desvios padrões, é necessário que ainda se tenham alguns comentários sobre as TABELAS VI-6 e VI-7 e GRÁFICOS VI de 1 a 10, com vistas, já agora e exclusivamente, aos desvios padrões. Constatam-se alguns fatos importantes que poderão ser apreciados, facilmente, no resumo apresentado nas TABELAS seguintes (VIII-3 e VIII-4). Ao analisá-las, verifica-se que, nas duas pistas, os desvios padrões obtidos no concreto cimento foram mais baixos do que no concreto asfáltico, sendo que na pista de Canoas (RS) os resultados foram ligeiramente pouco superiores aos de Santa Cruz (RJ).

Evidencia-se, assim, que os desvios padrões médios encontrados foram:

A. PARA 120 m DE PISTA (6 ESTACAS)		
P I S T A	LADO ESQUERDO	E I X O
Santa Cruz (RJ)	13,26 mm	12,26 mm
Canoas (RS)	6,37 mm	6,79 mm
RELAÇÃO SANTA CRUZ / CANOAS	2,08	1,81
B. PARA 100 m DE PISTA (5 ESTACAS)		
Santa Cruz (RJ)	12,11 mm	11,18 mm
Canoas (RS)	6,10 mm	6,55 mm
RELAÇÃO SANTA CRUZ / CANOAS	2,00	1,71

TABELA VIII-1 — (BASC - RJ)

PORCENTAGEM DO COMPRIMENTO DA PISTA PARA CADA CLASSIFICAÇÃO DOS ÍNDICES DE RUGOSIDADE,  
SEGUNDO A POSIÇÃO DAS MEDIDAS.

(*) ÍNDICE DE RUGOSIDADE (CLASSIFICAÇÃO)	P O S I Ç Ã O   D A S   M E D I D A S				
	LADO ESQUERDO DO EIXO Sentido CAB 22 → CAB 04		E I X O %	LADO DIREITO DO EIXO Sentido CAB 22 → CAB 04	
	a 8,40 m %	a 4,20 m %		a 4,20 m %	a 8,40 m %
RUIM	-	-	-	-	-
REGULAR	-	4,6	3,7	6,2	-
BOA	28,3	81,1	46,1	61,5	35,0
MUITO BOA	71,7	14,3	50,2	32,3	65,0

(\*) De acordo com o Manual de Projetos de Aeródromos da ICAO<sup>14</sup> e correlação apresentada por HAAS & HUDSON<sup>8</sup> (EQUAÇÃO IV-1).

TABELA VIII-2 — (BACO - RS)

PORCENTAGEM DO COMPRIMENTO DA PISTA PARA CADA CLASSIFICAÇÃO DOS ÍNDICES DE RUGOSIDADE,  
SEGUNDO A POSIÇÃO DAS MEDIDAS.

(*) ÍNDICE DE RUGOSIDADE (CLASSIFICAÇÃO)	P O S I Ç Ã O   D A S   M E D I D A S				
	LADO ESQUERDO DO EIXO Sentido CAB 12 → CAB 30		E I X O %	LADO DIREITO DO EIXO Sentido CAB 12 → CAB 30	
	a 8,40 m %	a 4,20 m %		a 4,20 m %	a 8,40 m %
RUIM	-	-	8,6	-	-
REGULAR (**)	10,6	14,8	21,5	13,7	14,4
BOA	42,4	80,8	69,9	76,4	66,3
MUITO BOA	47,0	4,4	-	9,9	19,3

(\*) De acordo com o Manual de Projetos de Aeródromos da ICAO<sup>14</sup> e correlação apresentada por HAAS & HUDSON<sup>8</sup> (EQUAÇÃO IV-1)

(\*\*) Insignificante no concreto asfáltico

TABELA VIII-3 DESVIOS PADRÕES MÉDIOS PONDERADOS CONSIDERANDO - SE TRECHOS DE 5 EM 5 ESTACAS E DE 6 EM 6 ESTACAS, A PARTIR DA ESTACA 00.

INTERVALO CONSIDERADO LOCAL REFERENTE AOS TRECHOS DE POSICÃO DO NIVELAMENTO	DE 5 EM 5 ESTACAS						DE 6 EM 6 ESTACAS					
	BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - RJ.			BASE AÉREA DE CANAÓAS - RS.			BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - RJ.			BASE AÉREA DE CANAÓAS - RS.		
	ASFALTO	CONCRETO	TODA PISTA	ASFALTO	CONCRETO	TODA PISTA	ASFALTO	CONCRETO	TODA PISTA	ASFALTO	CONCRETO	TODA PISTA
LADO ESQUERDO DO EIXO	13,06	4,28	12,16	6,38	4,38	5,81	15,23	4,41	13,91	7,07	4,42	6,33
EIXO DA PISTA	11,04	4,29	10,35	6,48	5,02	6,06	14,62	4,54	13,39	7,21	5,56	6,75
LADO DIREITO DO EIXO	12,46	4,63	11,65	—	—	—	15,68	5,42	14,43	—	—	—

TABELA VIII-4 DESVIOS PADRÕES MÉDIOS PONDERADOS CONSIDERANDO - SE TRECHOS DE 5 EM 5 ESTACAS E DE 6 EM 6 ESTACAS, A PARTIR DAS ESTACAS 02+10 E 03 RESPECTIVAMENTE.

INTERVALO CONSIDERADO LOCAL REFERENTE AOS TRECHOS DE POSIÇÃO DO NIVELAMENTO	DE 5 EM 5 ESTACAS						DE 6 EM 6 ESTACAS					
	BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - RJ.			BASE AÉREA DE CANOAS - RS.			BASE AÉREA DE SANTA CRUZ - RJ.			BASE AÉREA DE CANOAS - RS.		
	ASFALTO	CONCRETO	TODA PISTA	ASFALTO	CONCRETO	TODA PISTA	ASFALTO	CONCRETO	TODA PISTA	ASFALTO	CONCRETO	TODA PISTA
LADO ESQUERDO DO EIXO	12,65	2,09	12,06	7,15	4,57	6,38	13,75	4,41	12,61	7,12	4,24	6,40
EIXO DA PISTA	12,57	2,55	12,01	7,42	6,11	7,03	12,04	4,54	11,13	7,20	5,72	6,83
LADO DIREITO DO EIXO	13,49	4,38	12,98	—	—	—	14,31	5,42	13,22	—	—	—

As análises de variância feitas para os resultados obtidos com os desvios padrões, nas várias situações estudadas, como mostram as TABELAS VI-8.1 a VI-8.4, indicaram não haver nenhuma diferença estatística entre as linhas estudadas (no eixo e a 4,20 m à sua esquerda e direita) na pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), o que, de certa forma, está de acordo com os estudos de HOSANG<sup>11</sup> que mostram ser a maior faixa de incidência das operações de pouso e decolagem, aproximadamente nos 8 m centrais da pista. Com isso, teoricamente, há de se esperar que as deformações permanentes não variem muito naquela região.

Resultados semelhantes foram obtidos para a pista de pouso da Base Aérea de Canoas (RS), agora, através do teste *t*, de STUDENT (BRITTO<sup>34</sup>, GRANER<sup>6</sup>, SPIEGEL<sup>28</sup>, WONNACOTT & WONNACOTT<sup>35</sup>), pois se tratava apenas de duas linhas - no eixo e à sua esquerda.

Com a apreciação dos resultados do ponto de vista dos desvios padrões, fica comprovada a observação de SONNENBURG<sup>27</sup>, de que variações no comprimento de onda máximo admissível (*cutoff*) não implica em grandes variações nos desvios padrões (TABELAS resumo VIII-3 e VIII-4), isto é, não houve grandes variações nos desvios obtidos nas linhas estudadas em ambas as pistas, para 120 m (6 estacas) ou 100 m (5 estacas) de pista.

Ao se analisar as FIGURAS VI-4.A, B e C, e VI-5. A, B e C, comparando-se os trechos considerados críticos pelo GABARITO de 1,20 m x 3,0 cm com o critério dos desvios padrões, verifica-se boa correspondência, tanto com estudos feitos para 120 m, como para 100 m de pista. É importante lembrar-se que no caso da pista de pouso da Base Aérea de Canoas (RS), houve trechos que não foram avaliados pelo critério dos desvios padrões, como os das estacas 33 à 39, 58 + 10 à 63 + 10 e 84 à 90, devido a problemas já mencionados, de identificação do tipo de curva nas concordâncias verticais.

Quanto aos estudos com o GABARITO são sujeitos, de certa forma, a um pouco de subjetividade, quando se tem que limitar onde começa e até onde vai um trecho crítico, além do fato da grande demanda de tempo para desenho dos perfis e trabalhos de escritório, já citado no CAPÍTULO VI.

O método que emprega a análise direta dos dados obtidos no nivelamento topográfico geométrico é rapidíssimo, além de permitir a identificação de trechos não totalmente condenáveis, mas que já se encontram entre a situação de regular ou de TRANSIÇÃO, como se tem denominado anteriormente. Outra vantagem é que elimina o aspecto de subjetividade.

Ainda nas FIGURAS VI-4 e VI-5 (A, B, C), pode-se estimar as percentagens de cada linha estudada que se encontram assinaladas como críticas, ou na faixa de transição, como se pode observar no resumo abaixo:

PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE SANTA CRUZ (RJ)			
MÉTODO	LINHA ESQUERDA	E I X O	LINHA DIREITA
GABARITO	63,71 %	60,62 %	68,86 %
DESVIOS (120 m de pista)	54,64 % + 19,38 % *	56,19 % + 14,95 % *	74,54 % + 2,06 % *
DESVIOS (100 m de pista)	49,48 % + 14,23 % *	57,22 % + 5,15 % *	65,26 % + 2,58 % *
PISTA DE POUSO DA BASE AÉREA DE CANOAS (RS)			
M É T O D O	LINHA ESQUERDA	E I X O	
GABARITO	18,18 %	31,27 %	
DESVIOS (120 m de pista)	19,64 % + 10,55 % *	19,64 % + 19,00 % *	
DESVIOS (100 m de pista)	10,91 % + 17,45 % *	20,00 % + 9,45 % *	

(\*) Trechos assinalados na faixa de TRANSIÇÃO (entre 8,13 e 9,15 mm).

Com esses resultados, pode-se notar que a pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), considerando-se os três critérios conjuntamente, apresenta-se com cerca de 60 a 75,0 % de seu comprimento necessitando de reparos, enquanto que na outra pista, a de Canoas (RS), esse percentual se situa entre 18 a 39 %. Outra observação importantíssima, é que as áreas críticas da pista de pouso da Base Aérea de Canoas (RS) ocorrem em pequenos trechos isolados, apresentando desvio pa-

drão máximo de 12,22 mm (somente num trecho). Já na pista de Santa Cruz (RJ), o valor máximo foi da ordem de 45 mm.

Outro aspecto que merece destaque, é o fato de que para a pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), nas estacas 35 à 60, consultando-se as TABELAS VI-6.1 a VI-6.6 e VI-7.1 a VI-7.6 e os GRÁFICOS VI-1 a VI-6, identificam-se os maiores valores de desvios padrões. Uma análise mais acurada dos perfis topográficos geométricos, indicou tratar-se de área com grandes recalques (deformações permanentes). Esse fato pode ser comprovado num dos levantamentos topográficos realizados em 1975, para aquela pista, documento que se encontra arquivado na Diretoria de Engenharia da Aeronáutica.

Uma vez que os estudos desenvolvidos com os 803,70 m iniciais, a partir da cabeceira 22 da pista de pouso da Base Aérea de Santa Cruz (RJ), foram conduzidos recentemente e, portanto, deram origem a um CAPÍTULO especial — o de número VII, este será discutido como um todo, embora esporadicamente se façam alusões a aspectos abordados noutros CAPÍTULOS.

Como já demonstrado anteriormente, também foi observada boa correspondência entre os métodos do GABARITO de 1,20 m x 3,0 cm e procedimentos estatísticos (dos desvios padrões), como pode ser apreciado na FIGURA VII-1.

O resumo abaixo, dá idéia do percentual do comprimento total de cada linha estudada por um e outro método. No caso do método dos desvios padrões, o percentual inclui a soma dos trechos críticos e os considerados na faixa de TRANSIÇÃO.

MÉTODOS	LINHAS ESTUDADAS				
	À ESQUERDA		NO EIXO	À DIREITA	
	13,00 m	4,20 m		4,20 m	13,00 m
DO GABARITO	60 %	65 %	72 %	65 %	65 %
DOS DESVIOS PADRÕES	37 % + 22 % * (59 %)	82 %	82 %	82 %	52 % + 15 % * (67 %)

(\*) Trechos na faixa de TRANSIÇÃO (entre 8,13 a 9,15 mm)



Através dos desvios padrões, novamente constatam-se maiores deformações permanentes na faixa central, aproximadamente de 8 m, de acordo com o que se poderia esperar, face às conclusões de HoSANG<sup>11</sup>, já citadas anteriormente.

Analisando-se os GRÁFICOS VII-1.A a VII-1.E, verifica-se a tendência dos desvios padrões crescerem à medida que se afastam da cabeceira 22.

Consoante resultados obtidos, pode-se comprovar que os mesmos estavam de acordo com as informações dos pilotos. A única dúvida surgida foi com relação aos desvios padrões encontrados a 13,00 m do lado direito se apresentarem superiores aos da mesma posição no lado esquerdo, o que contrariaria as opiniões dos operadores das aeronaves.

Ao se observar, cuidadosamente, os perfis de nivelamento topográfico, próximos da estaca 00 (perfil dos 803,70 m em concreto cimento), encontrou-se uma grande BACIA, com uma CORDA aproximada de 92 m e dupla amplitude de 5,5 cm. Somente esta observação poderia deixar a desejar; mas, ao se estudar a TABELA VII-2, verificar-se-á que as maiores amplitudes (A) observadas se encontram, exatamente, na linha estudada a 4,20 m à esquerda do eixo, o que comprova, então, a opinião dos pilotos.

Além do mais, mesmo que as aeronaves decolassem EM FORMAÇÃO à linha de 13 m, ficariam a uma distância razoável do centro da pista e, obviamente, numa área menos solicitada por outras aeronaves em procedimentos rotineiros.

Estudando-se a TABELA VII-3, mais uma vez constata-se que as informações dos pilotos, de que as aeronaves tipo F-5E eram mais críticas, pois, pelo que se expôs nessa TABELA existe uma perfeita combinação entre FREQUÊNCIA DE RESPOSTA, VELOCIDADE e COMPRIMENTOS DE ONDA DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO (HAAS & HUDSON<sup>8</sup>, HALL & KOPPELSON<sup>7</sup>, LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, MORRIS<sup>17,18</sup>, MORRIS & HALL<sup>19</sup>, TUNG *et al*<sup>31,32</sup>, YANG<sup>36</sup>) para as três linhas estudadas na faixa central.

No caso do caça F-5B, observou-se essa relação, pelo menos teoricamente, só no eixo, embora a 4,20 m de um lado e outro do eixo, haja comprimentos de ondas próximos dos considerados críticos para as condições descritas.

A TABELA VII-3 vem comprovar, de forma contundente, as observações dos pilotos de que os problemas estavam ocorren-

do, aproximadamente, entre os 500 e 700 m do início da cabeceira 22.

É importante lembrar-se que, embora uma aeronave não esteja sujeita a uma vibração forçada, de regime permanente (ressonância), grandes BACIAS isoladas podem causar grandes cargas dinâmicas, como também acelerações verticais indesejáveis no compartimento do piloto. Tal afirmação, feita por TUNG *et al* <sup>31</sup>, encaixa-se perfeitamente nos aspectos aqui discutidos, principalmente se levados em conta os dados apresentados nas TABELAS VII-2 e VII-3, acentuadamente na última.

Aspecto dos mais importantes é o fato de que as grandes deformações permanentes estão ocorrendo exatamente na região de altas velocidades, ou de grande sustentação das aeronaves, próximo à decolagem. Essa observação está de acordo com as afirmações feitas por LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup> e MORRIS & HALL<sup>19</sup>. Seria prematuro admitir-se a explicação para esse fenômeno, como sugerem LEE & SCHEFFEL<sup>16</sup>, com base na teoria de energia cinética, não se dispondo de elementos e argumentos tanto para a pronta aceitação dessa hipótese, como para sua rejeição.

## CAPÍTULO IX

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

IX-1 CONCLUSÕES

1. O nivelamento topográfico de metro em metro das pistas de pouso ao longo de um ou mais alinhamentos pode ser uma opção economicamente válida, ao invés de medição com equipamentos sofisticados de elevado custo, desde que o trabalho de campo transcorra sem interferir com a operação das aeronaves; além disso, o trabalho de escritório que dele decorre é de fácil execução.

2. A análise dos dados de nivelamento topográfico, representados graficamente, pode ser feita por dois métodos: o do gabarito de 1,20 m por 3,0 cm (escalas de desenho:  $H = 1 : 100$ ,  $V = 1 : 1$ ) e de avaliação direta por análise estatística de trechos de 120 m de pista. Ambos os métodos permitem a identificação de áreas críticas de irregularidades de superfície de pistas de pouso, conforme normas existentes.

3. O método do gabarito é mais demorado, pois requer o desenho de perfis e contém certa dose de subjetividade; por outro lado, permite visualizar a superfície da pista e detectar de imediato as áreas críticas. Já o método de avaliação direta é pouco mais rigoroso, muito rápido de aplicar e permite identificar não somente as áreas críticas como, de modo melhor quantificável, as faixas de transição de irregularidades excessivas a irregularidades toleráveis.

4. O uso combinado dos dois métodos pode ser necessário quando a análise direta de dados aborda os trechos de concordância vertical de pequena extensão, situação que recomenda a análise pelo gabarito.

5. A metodologia aplicada ao estudo de irregularidades superficiais das pistas de pouso das Bases Aéreas de Santa Cruz (RJ) e de Canoas (RS), revelou que a primeira apresentou -se duas vezes mais rugosa do que a segunda. A de Canoas, entretanto, apresentou pequenas áreas ruins localizadas e, mesmo assim, pouco acima dos limites de tolerância admitidos, contras

tando com a situação da Base Aérea de Santa Cruz, cuja pista apresenta trechos insatisfatórios longos e de irregularidade acentuada.

6. Com apoio no conhecimento teórico-experimental existente e na aplicação dos métodos no caso concreto analisado, podem ser sugeridos, em primeira aproximação, os seguintes LIMITES TOLERÁVEIS de irregularidades de superfície tanto para novas construções, como para restauração de pistas ou de suas áreas críticas:

(a) gabarito com 1,20 m de comprimento por 1,77 cm de altura, para análise dos desenhos dos perfis topográficos geométricos; e

(b) desvio-padrão máximo de cerca de 5,7 mm para cada 120 m de pista.

7. Com base na experiência adquirida, parece suficiente o nivelamento topográfico geométrico de metro em metro de apenas uma linha na faixa central de, aproximadamente, 8 metros da pista, o que simplifica os trabalhos de campo e reduz os transtornos causados na utilização das pistas pelas aeronaves. Em casos especiais ou de interesse de pesquisa, justificar-se-ia mais de uma linha.

8. O emprego tão somente dos dois métodos a partir de nivelamento topográfico é insuficiente para responder questões suscitadas na operação das aeronaves na pista de Santa Cruz. Do estudo realizado ficou patente a estreita relação entre FREQUÊNCIA DE RESPOSTA DA AERONAVE, SUA VELOCIDADE e COMPRI-MENTO DE ONDAS DA SUPERFÍCIE DO PAVIMENTO, comprovando-se, sem muito requinte analítico, um fenômeno típico de RESSONÂNCIA.

9. As maiores deformações permanentes no trecho da pista que apresentava problema, (Base Aérea de Santa Cruz - RJ) encontram-se localizadas próximo às áreas de decolagem, fato que encontra explicação na referência bibliográfica do texto.

10. As informações precisas dos pilotos, ao descreverem como e onde ocorreram os problemas, assim como sobre sua maior ou menor incidência, são condições básicas e indispensáveis para um estudo mais aprofundado sobre a interação da aeronave com o pavimento, principalmente quando não se dispõe de processos mais sofisticados para tais estudos.

## IX-2

SUGESTÕES

1. Aplicação dos estudos realizados a um maior número de pistas, procurando-se confirmar ou ajustar os limites propostos nessa primeira aproximação.

2. Desenvolvimento de pesquisas, buscando-se relacionar informações de grande número de pilotos sobre o comportamento de várias pistas com os resultados obtidos através do emprego dos métodos estudados e da aplicação direta de técnicas de análise espectral. Poder-se-ia, então, partir para o estabelecimento final de níveis de irregularidades de superfície de pistas de pouso aceitáveis ou não, para diversas aeronaves e condições de operação das mesmas.

3. Acompanhamento, com avaliações periódicas, da evolução das irregularidades de superfície em pistas de pouso recém construídas e/ou recém restauradas, por meio de nivelamento topográfico geométrico e seu relacionamento com o tráfego.

4. Adaptação desses estudos a técnicas computacionais, buscando-se com isto respostas mais rápidas, com menores riscos de falhas humanas e eliminação ou atenuação de aspectos de subjetividade que, direta ou indiretamente, possam estar envolvidos.

5. Um estudo mais amplo de todos os aspectos abordados, através de técnicas de análise espectral.

6. Após conhecimento mais eficaz e seguro sobre as principais variáveis que possam estar envolvidas na interação da aeronave com o pavimento, e melhor domínio das técnicas computacionais necessárias a esses estudos, na medida do possível, partir-se de forma lenta e gradual, para a instrumentação de aeronaves buscando-se, assim, pesquisar suas respostas no que diz respeito a vibrações e acelerações verticais, dentre outros aspectos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - BARBOSA, R. C. & AREIAS NETTO, J. L. de A. - O rugosímetro na Avaliação dos Pavimentos. Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço. Rio de Janeiro, 1979. 33 p.
- 2 - BLACKMAN, R. B. & TUKEY, J. W. - The Measurement of Power Spectra. New York, Dover Publications Inc., 1958. 190 p.
- 3 - BRITTO, D. P. P. de S. - Estatística Experimental, Vol. I, Escola Nacional de Agronomia (DAENA), Rio de Janeiro, 1970. 147 p.
- 4 - BRITTO, D. P. P. de S. - Estatística Experimental, Vol. II, Escola Nacional de Agronomia (DAENA), Rio de Janeiro, 1970. 162 p.
- 5 - GERARDI, A. G. - "Dynamic Response of Aircraft to Pavement Unevenness", Research in Airport Pavements, Transportation Research Board, Special Report 175: 91-96, 1978.
- 6 - GRANER, E. A. - Estatística. São Paulo, Edições Melhoramentos, 1966. 184 p.
- 7 - HALL, A. W. & KOPELSON, S. - "The Location and Simulated Repair of Rough Areas of a Given Runway by Analytical Method", NASA, Washington, D. C., October, 1962.
- 8 - HAAS, R. & HUDSON, W. R. - Pavement Manegement Systems, New York , McGraw - Hill Book Company, Inc., 1978.
- 9 - HORN, W. J. - Airfield Pavement Smoothness Requirements. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report S-77-12 , Vicksburg, Mississipi, 1977.
- 10 - HORONJEFF, R. - Planning and Design of Airports. New York, McGraw - Hill Book Company, Inc., 1975. 460 p.
- 11 - HOSANG, V. A. - Field Survey and Analysis of Aircraft Distribution on Airport Pavements. Federal Aviation Administration, AD-A011 488 , NTIS, Springfield, VA, February 1975.
- 12 - HOUBOLT, J. C. - Runway Roughness Studies in the Aeronautical Field, Journal of the Air Transport Division, ASCE, Proceedings, AT.1(86): 11-31, March 1961.
- 13 - HOUBOLT, J. C., WALLS, J. A. & SMILEY, R. F. - "On Spectral Analysis of Runway Roughness and Loads Developed During Taxiing". NACA, Technical Note 3484, July 1955.
- 14 - INTERNATIONAL CIVL AVIATION ORGANIZATION - Aerodrome Design Manual , Part 3 - Pavements, 3: 53-57, 1977.
- 15 - LEDBETTER, R. H. - "Effects of Dynamic Loads on Airport Pavements", Research in Airport Pavements, Transportation Research Board, Special Report 175: 87-91, 1978.
- 16 - LEE, H. R. & SCHEFFEL, L. - "Runway Roughness Effects on New Aircraft Types". Journal of the Aero-Space Transport Division, ASCE, Proceedings, AT 1 (94): 01-17, November 1968.

- 17 - MORRIS, G. J. - "Response of a Jet Trainer Aircraft of Three Runways". NASA, Technical Note D-2203, May 1964.
- 18 - MORRIS, G. J. - "Response of a Turbojet and a Piston Engine Transport Airplane to Runway Roughness". NASA, Technical Note D-3161, December 1965.
- 19 - MORRIS, G. J. & HAAL, A. W. - "Recent Studies of Runway Roughness". NASA, SP-83, Conference on Aircraft Operating Problems, 1965.
- 20 - MORRIS, G. J. & STICKLE, J. W. - "Response of a Light Airplane to Roughness of Unpaved Runways". NASA, Technical Note D-510, September 1960.
- 21 - NORTHROP CORPORATION - "Northrop F-5B Support Planning Guide". Northrop Corporation, Aircraft Division, California, 1970.
- 22 - NORTHROP CORPORATION - "Northrop F-5E Support Planning Guide". Northrop Corporation, Aircraft Division, California, 1973.
- 23 - O'MASSEY, R. C. - "Aircraft Pavement Loading: Static and Dynamic". Research in Airports Pavements, Transportation Research Board, Special Report 175: 75-83, 1978.
- 24 - QUEIROZ, C. A. V. - "Medições de Irregularidade na Pista de Pouso e Decolagem do Aeroporto Internacional de Brasília". Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes - GEIPOT, Brasília, Nota Técnica nº 003/79, março de 1979.
- 25 - QUEIROZ, C. A. V. - "A Procedure for Obtaining a Stable Roughness Scale from Rod and Level Profiles". Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes - GEIPOT, Brasília, August 1981.
- 26 - SILSBY, N. S. - "An Analytical Study of Effects of Some Airplane and Landing Gear Factors on the Response to Runway Roughness with Application to Supersonic Transports". NASA, Technical Note D-1492, December 1962.
- 27 - SONNENBURG, P. N. - "Analysis of Airfield Runway Roughness Criteria". U. S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Report No. FAA-RD-75-110, November 1976.
- 28 - SPIEGEL, M. R. - Estatística. Coleção Schaum, São Paulo, Editora McGraw do Brasil, LTDA, 1977. 580 p.
- 29 - THOMPSON, W. E. - "Measurements and Power Spectra of Runway Roughness at Airports in Countries of the North Atlantic Treaty Organization". NACA, Technical Note 4303, July 1958.
- 30 - THOMSON, W. T. - Teoria da Vibração com Aplicações. Rio de Janeiro, Editora Interciência LTDA, 1978. 462 p.
- 31 - TUNG, C. C., PENZIEN, J. & HORONJEFF, R. - "The Effect of Runway Unevenness on the Dynamic Response of Supersonic Transports". NACA, CR-119, October 1964.
- 32 - TUNG, C. C., PENZIEN, J. & HORONJEFF, R. - "Response of Supersonic Transports to Runway Unevenness". Journal of the Aero-Space Transport Division, ASCE, Proceedings, AT 1 (92): 01-21, January 1966.

- 33 - VISSER, A. & QUEIROZ, C. A. V. - "Roughness Measurement Systems". Empresa Brasileira de Planejamento de Transportes - GEIPOT, Brasília, Working Document Nº 10, July 1979.
- 34 - WALLS, J. H., HOUBOLT, J. C. & PRESS, H. - "Some Measurements and Power Spectra of Runway Roughness". NACA, Technical Note 3305, November 1954.
- 35 - WONNACOTT, T. H. & WONNACOTT, R. J. - Introdução à Estatística. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1980. 589 p.
- 36 - YANG, N. C. - Design of Functional Pavements. New York, Mc-Graw - Hill Book Company, Inc., 1972.